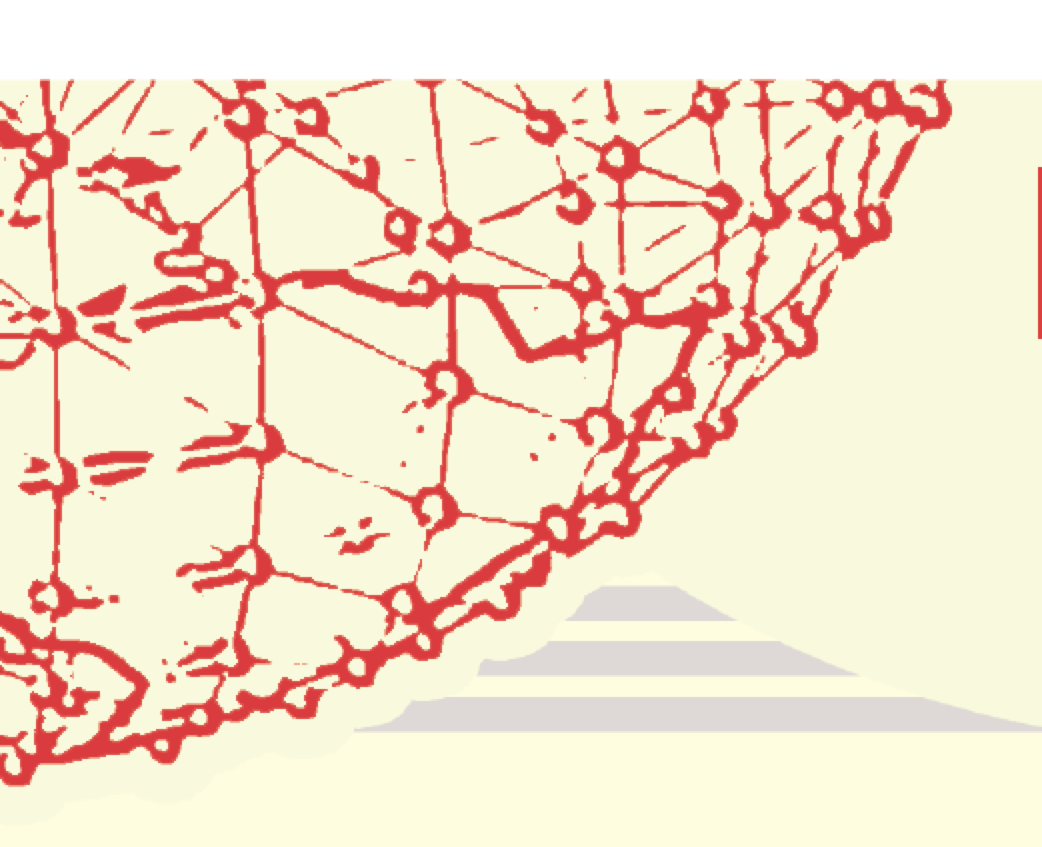




综合评价方法及其军事应用

COMPREHENSIVE EVALUATION METHOD AND ITS MILITARY APPLICATION

周华任　张晟　穆松　等　编著

清華大學出版社

清华汇智文库

综合评价方法及其军事应用

周华任　张　晟　穆　松　牛凌宇
房友园　王俐莉　张晨光　编著

清华大学出版社
北　京

内 容 简 介

本书介绍了综合评价方法及其在军事中的应用。全书分为10章，主要内容包括：综合评价研究综述、模糊评价方法、层次分析法、灰色综合评价法、网络层次分析法、武器装备成果评价、路线图方法、基于网络科学的评价方法、基于指数方法的装备体系作战能力评价和军事需求的综合评价。

本书的研究重点与创新成果体现在评价方法在军事中的应用，对解决一些军事的前沿问题或者一直困扰人们的问题有很好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

综合评价方法及其军事应用/周华任等编著. --北京：清华大学出版社，2015
(清华汇智文库)
ISBN 978-7-302-39240-8

Ⅰ.①综…　Ⅱ.①周…　Ⅲ.①综合评价－应用－军事　Ⅳ.①E0-059

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第024408号

责任编辑：高晓蔚
封面设计：汉风唐韵
责任校对：王凤芝
责任印制：

出版发行：清华大学出版社
网　　址：http://www.tup.com.cn，http://www.wqbook.com
地　　址：北京清华大学学研大厦A座　　**邮　　编**：100084
社 总 机：010-62770175　　**邮　　购**：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质量反馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
印 刷 者：
装 订 者：
经　　销：全国新华书店
开　　本：170mm×230mm　**印　　张**：15.25　　**字　　数**：240千字
版　　次：2015年　月第1版　　**印　　次**：2015年　月第1次印刷
印　　数：
定　　价：00.00元

产品编号：062609-01

前言

Foreword

综合评价是指当评价对象作为系统，涉及的因素众多、规模庞大、结构复杂，反映系统目标的指标体系是由众多指标组成的一个具有多层次结构的体系，此时需要将众多指标按层次结构进行综合而实施。评价理论涉及多元统计分析、心理学、运筹学、模糊数学等学科的有关知识。

本书分为10章，主要内容包括综合评价研究综述、模糊评价方法、层次分析法、灰色综合评价法、网络层次分析法、武器装备成果评价、路线图方法、基于网络科学的评价方法，基于指数法的装备体系作战能力评价和军事需求的综合评价。

本书的研究重点与创新成果体现在基于打击力、机动力、信息力、防护力和保障力(简单“五力”)的武器装备作战能力模糊聚类评价模型，基于灰色层次分析法的临近空间系统效能评价，网络层次分析法在目标选择中的应用，基于网络科学的评价方法，基于指数的装备体系作战能力评价和军事需求的综合评价，这些成果对目前军事中前沿或者一直困扰人们的问题做了相应的研究。

本书作者是周华任、张晟、穆松、牛凌宇、房友园、王俐莉和张晨光。

本书在写作工作中，国防大学的马亚平教授，国防大学科研部部长秦天、赵小松参谋，军事科学院的战晓苏研究员、冯伟研究员，国防科学技术大学的谭雪平副教授、空军装备研究院的马元正副研究员，海军指挥学院的鲁明教授、朱立新副教授，潜艇学院马亮教授，解放军理工大学原训练部部长薛通教授，解放军理工大学

副校长刘建永教授，解放军理工大学的张波院长、张宏军教授、徐伟主任、李进伟主任、姚泽清教授、刘守生教授和姚奎副教授等给予了指导和帮助，在此一并表示最诚挚的谢意。

由于编著者水平有限，书中疏漏及不妥之处在所难免，希望广大读者给予指正。

编　者

2015 年 1 月

目 录

Contents



第一章 综合评价研究综述

评价就是指明确目标测定对象的属性，并把它变成主观效用的行为，即明确价值的过程。评价可分为终结性评价和过程性评价。终结性评价一般是指对结果的评价，其目的是评价行动在多大程度上得到预期效果，为下一步行动提供决策依据。过程性评价的目的是揭示行动过程中存在的问题，以促进过程的改进。决策型评价模式的创立者斯塔弗尔比姆认为：方案评价的最重要的目的不是证明，而是改进。所以现代评价工作更重视过程性评价。

评价对象是指被评价其价值的对象。对评价对象进行价值判断并给出评价结论者称为评价者。评价的指标可能是单个，也可能是多个。当评价指标为单个时采用的方法比较简单；当评价指标为多个时，需要研究和讨论的问题比较多，因而形成了一个相当独立的研究领域。

从评价的理论方法及评价模型的发展方面来看，20 世纪 60—70 年代发展比较迅速，一些经典的评价方法如层次分析法、模糊综合评判法等，基本上都是这一时期的产物。当然，近十年来，也出现了一些新的评价模型和方法，如语言型评价方法等。但从应用情况来看，这些方法还未起到原来那些方法所发挥的作用。因此，在近十年的评价实践中，仍然还是那些经典的评价方法和模型在起主导作用。其主要原因，一是新的评价方法在理论上未有重大突破，未能完全克服经典方法中存在的局限性；二是对评价者选用的评价方法必须是经过实践考验的，其作用及局

限性比较清楚，评价的可信度较高。从国外的评价实践看，评价研究的重点是制定规范的评价程序；针对特定的评价对象，选择适用的评价模型和数据处理方法；对经典的评价方法加以改造，以适应特定的评价对象。

近年来，国内在科研项目评价中所使用的评价方法，基本上与国外所采用的方法相似，只是在指标体系、评价程序、规范性、独立性等方面仍有明显的差距，这是由于我国的评价工作尚处在探索阶段，评价的经验还不足。可以说，做好一项评价，除了评价者要具有较高的评价水平，更重要的是必须对评价对象比较熟悉，对其本质属性有较深的了解，这样才能结合特定的情况，设计出较为合理的、配套的评价方法。另外，通过评价实践获得的经验，以及掌握各项评价方法的优点和局限性，也是做好评价工作的关键之一。

第一节　综合评价的概念

一、综合评价

综合评价是指当评价对象作为系统，涉及的因素众多、规模庞大、结构复杂，反映系统目标的指标体系是由众多指标组成的一个具有多层次结构的体系，此时需要将众多指标按层次结构进行综合而实施的评价。综合评价理论涉及多元统计分析、心理学、运筹学、模糊数学等学科的有关知识。

二、综合评价的功能

（1）鉴定功能。即对评价对象的工作和结果的鉴定和评定。用评价标准判断评价对象达到目标的程度。

（2）导向功能。即引导决策按正确的方向进行，使评价对象沿着正确方向进

行改进和提高。

（3）激励功能。激发评价对象的积极性。

（4）研讨功能。通过评价对评价对象系统的效果和规律性进行研究和探讨。

三、综合评价的原则

（1）评价活动既是通过立法保障的、制度化的工作行为，又是专业性很强、技术含量很高的研究活动。如美国的国会技术评价办公室（OTA）是美国国会的评价机构之一，其任务在政府法律中都做了明确的规定。另外，为了确保评价质量，许多评价机构都制定了专业化的评价规范，要求评价者必须具备一定的资格和特定的能力，对使用数据的可靠性和评价结果的局限性要加以说明，评价活动的设计和实施必须符合规范要求，尤其是强调所采用的评价方法的合理性一定要经过论证。

（2）为决策服务是评价活动的基本宗旨，独立性、客观性是评价活动的要义。为了给决策者提供有用的分析结果和可靠的信息，必须保证评价方法的选择、评价活动的设计、实施及评价报告的完成是独立的、客观的，为决策服务的宗旨并不抹杀评价活动自身的规律，而“独立性、客观性”也并不妨碍委托者与评价者之间的沟通与交流。

（3）评价目标的明确化是确保评价质量的关键要素。往往评价目标明确的项目，其评价结果及发挥的作用就大；另外，作为委托者，要以达到决策必要的最小化的评价目标来确定评价的任务是比较明智的，不要期望一次评价能解决所有可能出现的问题，评价者通常都是选用一些成熟、简明、实用的评价方法。

（4）坚持决策导向与重视评价理论方法的创新。无论是形成评价问题，建立评价方法，还是确定评价结果的表达形式，都是以委托者的需求为依据，同时，各评价机构还应注意加强评价理论方法的研究，往往一项大的评价项目，就会针对评价问题的特点，设计一套评价方法，这也是评价活动具有生命力的原因之一。

四、综合评价的评价准则

尽管评价方法在科研项目评价过程中起着重要作用，但当前人们对评价方法的比较尚无过多的研究。通过征求评价专家的意见和多次评价实践，这里试给出一套针对评价方法的评价准则。这一评价准则系统由如下几个指标构成。

（1）精确性。精确性是指使用某种评价方法进行评价时，用

$$\frac{\text{评价结论}-\text{实际值}}{\text{实际值}}$$

来表示评价的误差。误差小说明精度高。评价实践中，在确定使用某种评价方法前，往往是找出以往的评价数据的结论来测试将要使用的评价方法的精度，以预测这种评价方法的评价精度。

（2）公正性。公正性是指一种评价方法在评价过程中保证被评价项目得到客观和无偏见的评审程度。

（3）可靠性。可靠性是指按某种评价方法评价出某一评价结果的概率。如果评价过程中出现同一结果的概率大，那么这种评价结果的可靠性就高。事实上，由于评价者认识水平等方面的差异及随着时间推移带来的认识上的先后差异，会造成评价结果为概率事件。但是，一种评价方法的应用导致趋同性应起主导作用，这样的评价结果才是可靠的。

（4）效用性。效用性是指某种评价方法得到的评价结果能否产生效用。就评价而言，假如评价结果认定的申请项目的事实促进了该领域科学事业的发展那么可以说这一评价结果是有效的，这种评价方法的效用性就好。事实上，一种评价方法的效用性要通过时间和实践的检验才能证实。

（5）最优性。最优性是指某评价方法在应用过程中为达到同样精度的评价结论时所需投入的人力、物力、财力及时间的多少。

（6）实用性。实用性是指评价方法易于得到使用人的理解和接受的程度。实用性高的评价方法应该是易于被人理解和接受的，要求的条件也不应该苛刻。

需要指出的是，从理论上讲，针对同一个科研项目，使用不同的方法应得到同样的评价结论。但在实际评价中却很难做到这一点。这就需要评价者根据上述评价准则，灵活地选择一种评价方法，有时甚至需要采取多种方法的结合，以发挥出某种方法的长处，抑制某种方法的短处。

第二节 综合评价的问题和步骤

一、综合评价问题的描述

科学评价是科学决策的前提,没有科学的评价也难以形成科学的决策。综合评价就是依据评价对象过去或当前一段时间的相关信息,对评价对象进行客观、公正、合理的全面评价。通常的综合评价问题都是包含有若干个同类的被评价对象(或系统),每个评价对象往往都涉及多个属性(指标),这类问题又称为多属性(多指标)的综合评价问题。综合评价的目的是根据系统的属性判断确定这些系统运行(或发展)状况的优劣,即按优劣对各评价对象进行排序或者分类。综合评价主要应用于研究与多目标决策有关的评价问题。

二、构成综合评价问题的五个要素

实际中一个综合评价问题必须要由五个要素组成,即评价对象、评价指标、权重系数、综合评价模型和评价者,五者缺一不可。

1. 评价对象

在一个综合评价问题中,评价对象应该是同一类的,且具有一定的可比性,其个数 n 要大于 1,不妨记为 n 个评价对象分别为 $s_1,s_2,\cdots,s_n(n>1)$。

2. 评价指标

对于每一个评价对象来说都应该有能够充分反映其现状的若干项指标,每项指标都是从不同的侧面反映评价对象优劣的程度,这些指标一起称为综合评价系统的指标体系。实际上,在建立问题的评价指标体系时,应遵守一定的原则。在这里不妨假设问题共有 m 项评价指标,依次记为 $x_1,x_2,\cdots,x_m(m>1)$,并引入指标数组 $x=(x_1,x_2,\cdots,x_m)$。

3. 权重系数

在实际问题中，对于不同的评价目的，各项评价指标之间的相对重要程度是不同的，评价指标之间的相对重要性的大小，通常用权重系数来刻画。若用 w_i 来表示第 i 项指标 x_i 的权重系数，则

$$w_i \geqslant 0 \quad (i = 1,2,\cdots,m)\text{，且 } w_1 + w_2 + \cdots w_n = 1$$

当评价对象及评价指标确定之后，综合评价的结果就完全依赖于权重系数了，即权重系数的合理与否将关系到综合评价结果的正确性和可信度。因此，权重系数的确定应按一定的方法和原则来完成。

4. 综合评价模型

基于评价对象的多项评价指标之和权重系数，利用适当的数学方法“合成”为一个整体性综合评价指标值，用于合成整体性综合评价指标的表达式（或算法）称为综合评价模型。问题是如何根据评价的目的（或准则）及被评价对象的特点来选择合适的综合评价模型是综合评价要解决的一个重要问题。

不妨设有 n 个评价对象 $s_1,s_2,\cdots,s_n(n>1)$ 的 m 项评价指标的指标值分别为

$$x_i = (x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{im}) \quad (i = 1,2,\cdots,n)$$

相应的权重系数为 $w = (w_1,w_2,\cdots,w_m)$，记综合评价模型（函数）为 $y = f(w,x)$，于是 n 个评价对象的综合评价指标值分别为 $y_i = f(w,x_i) \quad (i = 1,2,\cdots,n)$。

根据 n 个评价对象的综合评价指标值 $y_1,y_2,\cdots,y_n$ 的大小，将 n 个评价对象依次进行排序或分类，从而可以作为决策的依据。

5. 评价者

评价者（或决策者）可以是一个人，或一个群体，在明确了评价目的之后，要确定评价对象的评价指标体系和权重系数，建立综合评价模型都与评价者的知识、观念、意志和偏好等因素有关，因此，评价者在综合评价过程中起着重要的作用。

三、综合评价的一般步骤和流程

针对一般的综合评价的实际问题，解决问题的一般步骤如下。

（1）明确要综合评价的问题，确定综合评价的目的；

（2）确定被评价对象；

（3）建立评价指标体系，包括收集评价指标的原始数据和对评价指标数据的若干预处理等；

（4）确定与各项评价指标相对应的权重系数；

（5）选择或构造综合评价模型；

（6）计算各被评价对象的综合评价的指标值，并依此做出合理决策（排序或分类选择）。

综合评价的过程不是一个随意的简单问题，而是一个对评价者和实际问题的主客观信息综合集成的复杂过程。综合评价的一般流程如图 1-1 所示。

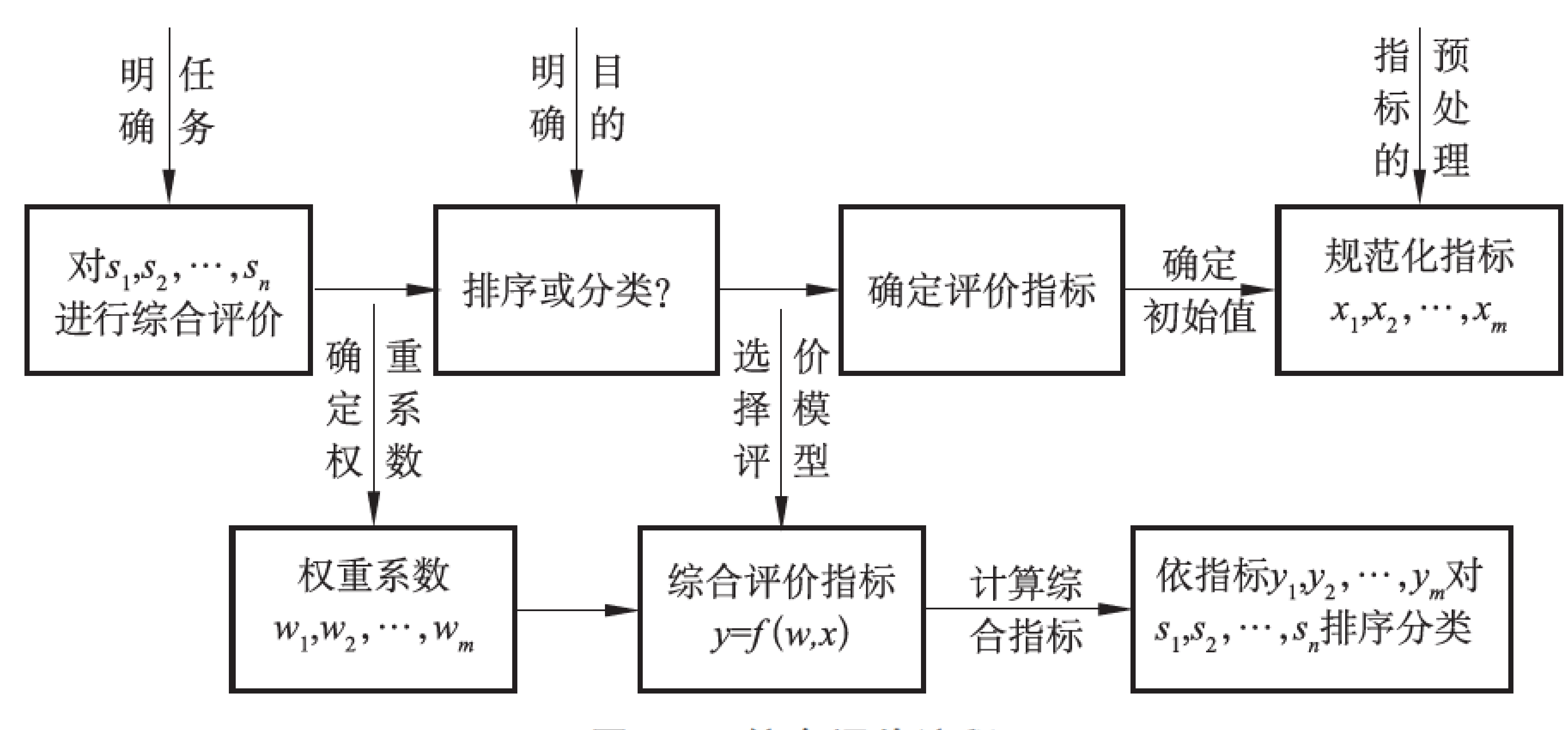


图 1-1　综合评价流程

第三节　指标体系的建立

一、指标体系确定的原则

1. 完备性原则

完备性原则是指标应尽可能完整、全面地反映和度量评价对象。

2. 独立性原则

在评价设计指标时，有些指标之间往往会有一定的相关性，因而要采用科学的方法处理相关程度较大的因素，使每一指标在体系中只能出现一次。有时的确无法确定指标之间的相关性程度，所以有的评价方法（如主成分分析法、网络层次分析法等）对独立性的要求不高。

3. 代表性原则

代表性原则是指评价指标能代表评价目标的要求和希望。

4. 可比性原则

可比性原则是指评价指标体系应当对所有评价对象都适用，评价标准应对所有评价对象都一视同仁。

5. 可操作性原则

可操作性原则是指评价指标及其内容的表达要确切，指标内容最好能给出定量的特征值，如不能是定量的，其定性的文字表达也要明确、详尽，尤其是要给出指标价值函数的增减性，即评价分数是随特征值的序贯变化而递增还是递减。

6. 简练性原则

简练性原则是指评价指标树的层次数及分支数要适宜，既要使评价指标能有具体的表达或有具体的特征值，以能对号入座、方便评价，又要层次清晰，使评价者一目了然，不致过于冗余。

建立指标体系的常用方法是 Delphi 法。它是一种使一群专家意见集中起来的咨询方法。常采用问卷调查的形式。采用这种方法时，一般先罗列一些指标，请一定数量的专家打分，当专家打分趋于一致后，可依据专家打分的结果进行指标的重要性筛选。

指标筛选还可根据收集到的关于指标的样本数据来进行。常用的方法有条件广义方差极小法、极大不相关法、选取典型指标法、最小均方差法、极小极大离差法等。

二、制定评价指标体系的结构和评价准则

1. 确定指标体系的层次结构

确定指标体系的层次结构的目的是为了合理地确定指标的权重。当有评价指标众多时，指标的权重就很难确定。通过指标体系的层次结构，层层分解，确定指标的最终权重分配就较容易实施。但如何确定层次结构，指标体系应该分几层较合理，每层有多少较合适，目前研究得比较少。

2. 确定指标的评价标准及其取值范围

定性指标一般用离散的数值用表示，如用 1、2、3、4、5 表示优、良、中、合格、不合格。定量指标取其量化值即可，定量指标也分为离散取值指标和连续取值指标。目前研究较多的语言型评价方法是一种对无须对定性指标进行量化而直接进行评价的方法。

3. 指标的标准化方法

依据其性质指标可分为极大型、极小型、固定型、偏离型、区间型、偏离区间型等 6 种类型。极大型为取值越大越好，极小型为指标取值越小越好，固定型为指标取值为某个固定值是最理想的状态，偏离型为指标越偏离某一固定值越大越好，区间型为指标取值在某区间是最佳状态，而偏离区间型为指标取值偏离某一区间越大越好。

指标的标准化可分为一致化和无量纲化。一致化就是将不同类型化为同一类型（一般取极大型）。无量纲化也称规范化、归一化等，即如何将统计数据压缩到同一区间，一般为[0，1]，最常见的归一化方法为

$$y_i = \frac{x_i - \min x_i}{\max x_i - \min x_i}$$

有时也可将这两步合并成一步进行。如对极小化指标，无须指标正规化直接采用如下方法归一化即可。

$$y_i = \frac{\max x_i - x_i}{\max x_i - \min x_i}$$

4. 无量纲化方法

(1) 直线型

① 极值法

极值法的主要思想是线性放大或缩小的归一化方法，它的公式为使用极大或极小的指标数据的线性函数，主要公式有

$$y_i = \frac{x_i}{\max x_i} \quad (x_i \geqslant 0)$$

$$y_i = \frac{x_i - \min x_i}{x_i}$$

$$y_i = \frac{x_i - \min x_i}{\max x_i - \min x_i} k + q \quad (k, q \text{ 为控制参数})$$

线性方法是一种最简单、最基本的应用最广泛的一种方法，较其他非线性方法容易被理解和应用。无量纲化的结果对最终评价结果有较大的影响。如当对某课程四人的得分为(70,80,90,100)时，按公式(1)和(2)的方法归一化后的四人的值分别为(0.7,0.8,0.9,1)和(0,0.14,0.22,0.3)。归一化后的数据(0.7,0.8,0.9,1)可用来做结论性评价，(0,0.14,0.22,0.3)只能用来做排定名次的相对排序。

② Z-score 法

公式为

$$y_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s}$$

其中，$\bar{x}$，s 为指标数据的均值和均方差。

y_i 也可化成百分数的形式，公式为

$$y_i = 50 + \frac{x_i - \bar{x}}{s} \times 10$$

③ 比重法

公式为

$$y_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^{n} x_i}$$

或者为

$$y_i = \frac{x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}}$$

(2)折线型无量纲化方法

折线型无量纲化方法实质上是一种分段线性归一化方法,简单的公式为

$$y_i = \begin{cases} 0 \\ \dfrac{x_i}{x_m} y_m & (0 < y_m < 1, 0 < x \leqslant x_m) \\ y_m + \dfrac{x_i - x_m}{\max x_i - x_m}(1 - y_m) & (x > x_m) \end{cases}$$

以上折线以 x_m 为界分成两段直线,必要时可根据实际情况做多个分段折线。

(3)曲线型无量纲化方法

对于极大型指标的常用曲线型无量纲化方法主要有以下几种方法。

① 升半 Γ 型

$$y_i = \begin{cases} 0, 0 \leqslant x \leqslant a \\ 1 - e^{-k(x-a)}, x > a, k > 0 \end{cases}$$

② 半正态型

$$y_i = \begin{cases} 0, 0 \leqslant x \leqslant a \\ 1 - e^{-k(x-a)^2}, x > a, k > 0 \end{cases}$$

③ 升半柯西型

$$y_i = \begin{cases} 0, 0 \leqslant x \leqslant a \\ \dfrac{k(x-a)^2}{1 + k(x-a)^2}, x > a, k > 0 \end{cases}$$

④ 升半凸凹型

$$y_i = \begin{cases} 0, 0 \leqslant x \leqslant a \\ a(x-a)^k, a \leqslant x \leqslant a + \dfrac{1}{\sqrt[k]{a}} \\ 1, x \geqslant a + \dfrac{1}{\sqrt[k]{a}} \end{cases}$$

⑤ 升半岭型

$$y_i = \begin{cases} 0, 0 \leqslant x \leqslant a \\ \dfrac{1}{2} - \dfrac{1}{2}\sin\dfrac{\pi}{b-a}\left(x - \dfrac{a+b}{2}\right), a \leqslant x \leqslant b \\ 1, x > b \end{cases}$$

对于极小型指标可仿照上述方法变为降半型分布。区间型指标的曲线型无量纲化方法应由升、平、降三部分组成。曲线型无量纲化方法的形式多种多样，可参照模糊数学确定隶属度的许多方法（许多典型的隶属度函数）进行指标的无量化工作。

三、指标的合成方法

1. 线性加权和法

线性加权和法的基本公式为

$$x = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i$$

式中，x 表示评价对象得到的综合评价值；w_i 表示单个指标的权重；x_i 表示单个指标的评价值；n 表示评价指标个数。

有约束的线性加权和法的公式为

$$x = k\sum_{i=1}^{n} w_i x_i$$

$$k = \prod_{i=1}^{n} k_i$$

式中，k_i 表示判别单个是否达到最低要求的逻辑值。如达到最低要求取 1，否则取 0。

线性加权和法有以下几个特点：

（1）线性加权和法适用于评价指标间相互独立的场合，各指标对综合评价的贡献彼此是没有什么影响的。

（2）采用线性加权和法各指标可以线性地补偿。

(3) 采用线性加权和法各指标权重的作用比在其他方法合成中更明显些。

(4) 线性加权和法突出了评价权重较大且指标评价分数较大者的作用。

(5) 线性加权和法对不同评价对象间的指标评价值的差异反映不太敏感。

(6) 线性加权和法对数据没有什么特定的要求。

(7) 线性加权和法计算比较简便,便于推广。

2. 乘法合成法

乘法合成法的基本公式为

$$x = \left(\prod_{i=1}^{n} x_i\right)^{\frac{1}{n}} \quad (x_i > 0) \qquad \text{(简单式)}$$

或

$$x = \left(\prod_{i=1}^{n} x_i^{w_i}\right)^{\frac{1}{\sum w_i}} \quad (x_i > 0) \qquad \text{(加权式)}$$

乘法合成法有以下几个特点:

(1) 乘法合成法适用于指标间有强烈关联的场合。

(2) 乘法合成法强调评价各指标评价值的一致性,要求评价对象各指标间的差异较小,任何一方面都不能偏废。由 $\frac{a+b}{2} \geqslant \sqrt{ab}$ 且 $a=b$ 时等式成立可知,当两个评价对象得分总和相同,如采用乘法合成法进行评价时,各指标得分相同者得最高分。若用 10 个指标来评价 A、B 两位研究生的综合素质,A 的 9 项指标都是"好",另一项指标很差,而 B 的 10 项指标"较好",按乘法合成法很可能 B 好于 A。

(3) 乘法合成中指标的权重不如线性加权和法明显。

(4) 乘法合成法的结果突出了评价值中较小数的结果。

(5) 乘法合成法对指标评价值的变动比线性加权和法更敏感。

(6) 乘法合成法和线性加权和法对数据有较高的要求,不允许出现 0 和负数。

(7) 乘法合成法在计算上比线性加权和法稍复杂些,在推广应用上不如线性加权和法广泛。

3. 加乘混合法

加乘混合法的基本公式为

$$x = \sum_{i=1}^{n} x_i + \prod_{j=1}^{m} x'_j$$

或

$$x = \sum_{i=1}^{n} x_i / \prod_{j=1}^{m} x'_j$$

或

$$x = \sum_{i=1}^{l} w_k \prod_{j=1}^{nk} x'_j$$

$$x = \prod_{k=1}^{l} \sum_{i=1}^{nk} w_i x_i$$

加乘混合法兼有线性加权和法和乘法合成法的性质，加乘混合法的适用范围比线性加权和法和乘法合成法更广泛些。

美国乔治敦大学战略与国际研究中心主任克莱因在20世纪80年代初对综合国力进行系统的定量比较和分析，认为综合国力分为物质力量和精神力量两部分。这两部分可以相互作用，共同促进一国综合国力的提高，在此基础上，他提出的综合国力评价方程为

$$P_p = (C + E + M)(S + W)$$

式中，P_p 表示被确认的综合国力；C 表示基本实体，包括人口和领土；E 表示国民生产总值和其他经济指标，如能源。关键性非燃料矿物、工业生产能力，食品生产能力等；M 表示军事能力，等于战略力量加常规军事力量；S 表示战略意图；W 表示贯彻国家战略的意志。该评价方程被称为“国力方程”。

克莱因采用的就是加乘混合法对指标进行合成的。而克雷佛·基曼的综合国力方程同样采用了加乘混合法进行多指标综合，其方程为

$$G = N(L + P + I + M)$$

式中，G 表示被确认的国力；N 表示核能力；L 表示土地；P 表示人口；I 表示工业基础；M 表示军事能力。

4. 代换法

代换法的基本公式为

$$x = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - x_i) \quad (0 \leqslant x_i \leqslant 1)$$

代换法有以下几个特点：

(1)代换法的各评价指标对综合评价值具有同等重要的意义。

(2)代换法中指标间补偿作用远比线性加权和法的补偿充分，是最充分的。不管其他评价指标取值如何，只要有一个评价指标达到最高水平，整个综合评价值便达到最高水平。它不强调不同指标评价值间的一致性，偏向于诸评价指标中的异军突起，所谓“一俊遮百丑”。

四种合成方法的比较如表 1-1 所示。

表 1-1　四种合成方法的比较

方法性质 / 方法 / 比较方面	代换法	线性加权和法	加乘混合	乘法合成法
指标值间补偿作用	可完全补偿	线性补偿	部分补偿	很小补偿
指标间关系	相关	独立	部分相关	相关
权重作用	通常不设权重	较重要	一般	不大重要
对指标值间差异应用的反映	最不敏感	不敏感	较敏感	最敏感
计算复杂度	较乘法合成法复杂些	最简单	较复杂	比线性加权和法复杂些
合成结果	取决于评价值中的最高水平	突出较大评价值且权重较大者的作用	介于线性加权和法与乘法合成法之间	突出较小评价者的作用
方法原则	主因素决定型	主因素突出型	主因素决定型	因素并列型

指标的合成方法应依据指标评价值之间数据差别的大小和评价指标重要程度差别的大小来选取，具体方法可参照表 1-2 来确定。

表 1-2　指标的合成方法

项目		指标评价值间差别：小	指标评价值间差别：大
指标间重要程度差别	小	线性加权和法或乘法合成法	乘法合成法
指标间重要程度差别	大	线性加权和法	加乘混合法

四、关于权重的确定

指标的权重是综合评价的重要信息，是指指标对总目标实现的贡献程度，它反映了各指标在评价对象中价值地位的系数。

广义上讲，权重的数量形式可以多种多样的，可以是绝对数，也可以是相对数；可以是结构绝对数，也可以是比例相对数；可以是正数，也可以负数。广义的权重分为实质性权重（通过频数权重，如总人数中高级知识分子的比例权重就是实质性权重）、估价权重（各评价指标的重要性程度）、信息量权重（通过分辨信息多少来确定的一种权重）、可靠性权重（评价指标数值可靠性大小判定其重要程度而确定的权重）、系统效应权重（评价指标与评价目标之间的关系来制定的权重，若某指标变动引起总水平同方向变动，则系统效应权重为正值，反之为负值。若某指标变动引起总水平的较大变动，则系统效应权重较大）。

不同的权重将导致不同的评价结果，确定权重常常是一个引起争论的问题，合理确定权重非常重要。目前确定权重的方法有数十种之多，依据计算权重数据的来源不同确定权重的方法可以分为主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法。

1. 主观赋权法

主观赋权法能较好地反映评价对象所处的背景条件和评价者的意图，但权重的准确性有赖于专家知识和经验的积累，因而具有较大的主观随意性。主观赋权法主要有相对比较法、连环比率法、PATTERN 法、专家咨询法、集值迭代法、层次分析法等。层次分析法是主观赋权法中最常用的一种方法，与其他方法相对，有更多的讨论和研究成果。

群组判断时权重的确定方法主要有以下两种情形。

【情形一】 专家直接给出了各指标权重值。选择专家 N 人对 n 个指标的权重进行确定，假设第 i 个专家直接给出的权重向量为 $\boldsymbol{W}_i = (w_1^i, w_2^i, \cdots, w_n^i)$，则最终权重分配由以下几种方式确定。

（1）简单平均法

公式为

$$\boldsymbol{W}=\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}w_1^i,\quad \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}w_2^i,\quad \cdots,\quad \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}w_n^i\right)$$

（2）加权平均法

公式为

$$\boldsymbol{W}=\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\lambda_i w_1^i,\quad \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\lambda_i w_2^i,\quad \cdots,\quad \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\lambda_i w_n^i\right)$$

（3）正态分布修正加权平均法

公式为

$$\boldsymbol{W}=\left(c\sum_{i=1}^{N}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}y_{1i}^2}w_1^i,\quad c\sum_{i=1}^{N}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}y_{2i}^2}w_2^i,\quad \cdots,\quad c\sum_{i=1}^{N}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}y_{ki}^2}w_n^i\right)$$

其中，c 为归一化常数。y_{ki} 的计算公式为

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(w_k^i-\overline{w}_k)^2}{N-1}} \tag{1}$$

$$y_{ki}=\frac{w_k^i-\overline{w}_k}{S} \tag{2}$$

该加权平均法对每一个指标中打分居中者得到了如正态分布特性的较大权重，从而使权重确定更具合理性，如图 1-2 所示。

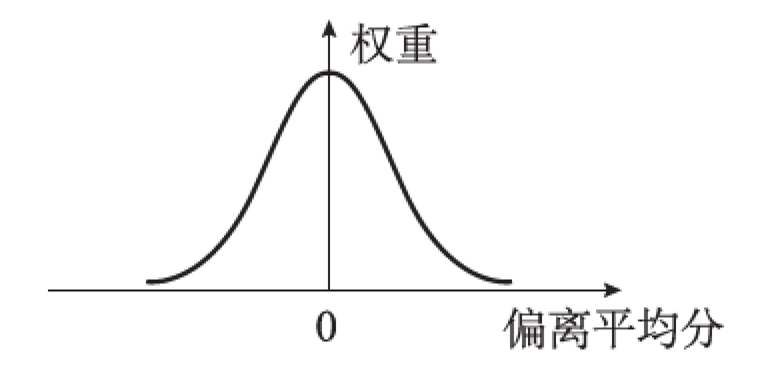


图 1-2　准确度模型

（4）简单几何平均法

公式为

$$\boldsymbol{W}=\left(c\prod_{i=1}^{N,}w_1^i,\quad c\prod_{i=1}^{N}w_2^i,\quad \cdots,\quad c\prod_{i=1}^{N}w_n^i\right)$$

其中，c 为归一化常数。

(5) 加权几何平均法

公式为

$$\boldsymbol{W}=\left(c\prod_{i=1}^{N}(w_1^i)^{\lambda i},\quad c\prod_{i=1}^{N}(w_2^i)^{\lambda i},\quad \cdots,\quad c\prod_{i=1}^{N}(w_n^i)^{\lambda i}\right)$$

其中,c 为归一化常数。

正如前面所介绍,几何平均在评价值相差不大时较有效。专家在计算指标相对权重时的权重值应相差不大,故几何平均较适合于此种情形。

【情形二】 每个专家独立地对各项评价指标间相对重要程度作出评价,给出两两判断矩阵,从而构成了 N 个判断矩阵和 N 个权重。此时有以下两种处理方案。

［**方案 1**］ 首先将 N 个判断矩阵用线性或几何平均的方法求得一个合成的综合判断矩阵,加权几何平均能使得原来满足一致性检验的判断矩阵经加权几何平均后仍满足一致性要求,且一致性指标值要比简单线性加权得到的综合判断矩阵更符合一致性要求。然后根据综合判断矩阵使用层次分析法得综合权重向量。

［**方案 2**］ 首先对第 i 个专家判断矩阵,用层次分析法求得第 i 个专家的权重向量,然后再对这 N 个权重向量进行加权平均。专家权重的确定可以依据专家的权威的大小确定,也可依据专家打分的一致性程度的大小赋权。一致性程度的判定可依据一般层次分析法中的计算公式求得,不妨设为 $\beta_i(i=1,2,\cdots,N)$,则其权重可由

$$w_i=\frac{1}{\beta_i}$$

经归一化后得到。

2. 客观赋权法

客观赋权法依赖于来自实际的原始数据来确定权重。客观赋权法主要有熵值法、拉开档次法、逼近理想点法等。若有 m 个评价对象、n 个评价指标,用 x_{ij} 表示第 i 个评价对象第 j 个指标的原始数据值。

(1) 熵值法。熵是信息论中测定不确定性的量,信息量越大,不确定性越小,熵值也就越小;反之,信息量越小,不确定性就越大,熵值也就越大。熵值法的计算

过程如下。

Step 1：将 x_{ij} 做正向正规化处理，并计算第 j 个指标第 i 个方案所占的比重。

$$p_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}x_{ij}}\quad(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$$

Step 2：计算第 j 个指标的熵值 e_j 。

$$e_j=-k\sum_{i=1}^{m}p_{ij}\ln p_{ij}\quad(j=1,2,\cdots,m,k\geqslant 0)$$

Step 3：计算第 j 个指标的差异系数 g_j（$j=1,2,\cdots,m$）。

$$g_j=1-e_j$$

Step 4：计算第 j 个指标的权重 w_j 。

$$w_j=\frac{g_j}{\sum_{j=1}^{m}g_j}$$

熵值法是根据指标观测值之间的差异程度的大小来确定权重的。指标观测值差异越大，则该指标的权重系数越大；反之越小。显然，这样的方法有可能造成重要指标的权重反而较小而不重要的指标的权重系数大的不合理的情形。

（2）拉开档次法。拉开档次法是突出整体差异性的确定权重的方法，即从整体上尽量体现各指标之间的差异。如设 $\boldsymbol{A}=(x_{ij})_{m\times n}$ 为由评价数据组成的矩阵 $\boldsymbol{H}=\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}$，则拉开档次法的权重为下面二次规划模型的最优解：

$$\max \boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\boldsymbol{W}$$

$$\text{s. t.}\begin{cases}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}=1\\ \boldsymbol{W}>0\end{cases}$$

（3）逼近理想点法

设评价系统的理想点为 $\boldsymbol{X}^*=(x_1^*,x_2^*,\cdots,x_n^*)$，任一评价对象 $\boldsymbol{X}_i=(x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{in})$ 与 $\boldsymbol{X}^*$ 间的加权欧氏距离为

$$h_i=\sum_{j=1}^{n}[w_j(x_{ij}-x_j^*)]^2=\sum_{j=1}^{n}w_j^2(x_{ij}-x_j^*)^2$$

求优化问题的最优解即为逼近理想点法求得的指标权重系数。

$$\max\sum_{i=1}^{m}h_i^2=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}w_j^2(x_{ij}-x_j^*)^2$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\sum_{j=1}^{n} w_j = 1 \\ w_j > 0 \quad (j = 1,2,\cdots,n)\end{cases}$$

用拉格朗日(Lagrange)函数求解得到

$$w_j = \frac{\dfrac{1}{\sum_{i=1}^{m}(x_{ij} - x_j^*)^2}}{\sum_{j=1}^{n}\dfrac{1}{\sum_{i=1}^{m}(x_{ij} - x_j^*)^2}} \quad (j = 1,2,\cdots,n)$$

这类赋权方法容易出现“重要指标的权重系数小而不重要的指标权重系数大”的不合理现象。

3. 组合赋权法

组合赋权法就是采用主观赋权法和客观赋权法等多类方法,确定指标权重。

第四节　确定评价方法和评价结果

一、多属性综合评价方法

多属性综合评价方法是指把评价对象的多指标看成多个属性,采用多属性决策的有关理论与方法来进行评价的方法。它是最为基本的评价方法。

1. 评价对象(方案)的筛选

当评价对象的数量太多时,在正式评价之前,应尽可能地筛除性能比较差的方案,以减少评价的工作量。当然,有时虽然评价对象很多,且许多对象的指标属性值很差,但确是需要进行评价的对象,因而也不能筛除,否则;这些被筛除掉的评价

对象就得不到评价结果。

筛选方法有优选法、满意值法和逻辑和法三种。

优选法又称优势法，是利用优势原则去淘汰一些较差的评价对象。即若评价对象集合中的 A_i 与 A_j 相比，对象 A_i 至少有一个属性值严格优于对象 A_j，而且对象 A_i 的其余属性值均不劣于对象 A_j，则称对象 A_i 比对象 A_j 占优势，处于劣势的对象 A_j 可以从评价对象集中删除。

满意值法又称逻辑乘法（即与门）。设各指标均为效益型，对每一指标提供一个能够被接受的最低值，称为切除值。只有当评价对象的所有指标均不低于相应的切除值时，对象才被保留。只要有一个指标值小于相应的切除值，方案就被删除。

逻辑和法又称逻辑或门法。它为每一指标规定一个阈值，只要评价对象有一个指标值优于对应指标的阈值，该对象就被保留。

2. 指标合成评价方法

根据指标合成的相关方法，根据指标的属性值和权重进行加权综合。最常见的线性加权平均。其计算公式为

$$U_i = \sum_{i=1}^{n} w_j V_j(x_{ij})$$

式中，U_i 表示评价对象 i 的综合评价值；w_j 表示指标 j 的权重系数；x_{ij} 表示第 i 评价对象第 j 个指标的属性值；$V_j(x_{ij})$ 表示 x_{ij} 标准化的评价值。

3. 理想点法

理想点法的评价过程如下。

Step 1：建立评价矩阵。

$$\boldsymbol{X}=(x_{ij})=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Step 2：求标准化矩阵。

$$\boldsymbol{Y}=(y_{ij})=\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{m1} & y_{m1} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix}$$

Step 3：确定近似正理想方案和负理想方案。

$$\boldsymbol{I}^{+}=(y_1^{+},y_2^{+},\cdots,y_n^{+})\ ,\ \boldsymbol{I}^{-}=(y_1^{-},y_2^{-},\cdots,y_n^{-})$$

Step 4：求各个评价对象与理想决策方案的近似度。

$$\alpha_i^{+}=\left(\sum_{j=1}^{n}w_j\ |y_j^{+}-y_{ij}|^{p}\right)^{\frac{1}{p}},\alpha_i^{-}=\left(\sum_{j=1}^{n}w_j\ |y_j^{-}-y_{ij}|^{p}\right)^{\frac{1}{p}},i=1,2,\cdots,m。$$

Step 5：计算。

$$U_i=\frac{\alpha_i^{-}}{\alpha_i^{+}+\alpha_i^{-}}$$

并以此值作为评价 i 的综合评价值。

此外，还有 Z-分综合评价法、RSR 值综合评价法、ELECTRE 法、PROMETHEE 法等。Z-分综合评价方法根据大量分布的正态性对数据进行标准化处理后再求和，并以此作为最终评价值。RSR 值综合评价法则对所有评价对象各指标的值进行排序后计分，排在最后的记 1 分，并依此递增，最后计算各评价对象的总得分，并以此作为最终评价值。ELECTRE 法、PROMETHEE 法处理过程相对复杂，应用也较少。

二、多元综合评价分析方法

1. 主成分分析评价方法

主成分分析的基本思想是设有 m 个评价对象，n 个评价指标 $\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{X}_2,\cdots,\boldsymbol{X}_n$，其评价矩阵为

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{X}_2,\cdots,\boldsymbol{X}_n)=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

每一行就是一个样本的观察值。已知数据矩阵 $\boldsymbol{X}$，若能找到一个线性函数

$$\boldsymbol{Y} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \boldsymbol{X}_i$$

能最好地反映 n 个指标 $\boldsymbol{X}_1, \boldsymbol{X}_2, \cdots, \boldsymbol{X}_n$ 的变化状况，即用此线性函数来综合表示 n 个指标在 m 个样本上的变异，此函数就是一个代表性很好的综合指标，它就是这 n 个指标的主要成分。找出这个主要成分的方法称为主成分分析法。主成分分析法先对 m 个点 $(x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{in})$ 求出第一条“最佳拟合直线”，使得这 m 个点的垂直距离的平方和最小，并称这条直线为第一主成分。然后再求与第一主成分相互独立(或者说垂直)的，且与 m 个点 $(x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{in})$ 的垂直距离平方和最小的第二主成分，依此类推，可以得到其他的主成分。

主成分分析的步骤如下。

Step 1：计算相关系数矩阵。

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix}$$

$r_{ij}(i, j = 1, 2, \cdots, n)$ 为原变量 x_i 与 x_j 的相关系数，$r_{ij} = r_{ji}$，其计算公式为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{n} (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n} (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^{n} (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}}$$

Step 2：计算特征值与特征向量。

解特征方程

$$|\boldsymbol{\lambda I} - \boldsymbol{R}| = 0$$

常用雅可比法(Jacobi)求出特征值，并使其按大小顺序排列 $\lambda_1 \geqslant \lambda_2 \geqslant \cdots \geqslant \lambda_n \geqslant 0$ 分别求出对应于特征值 λ_i 的特征向量 $\boldsymbol{e}_i(i = 1, 2, \cdots, m)$，要求 $\|\boldsymbol{e}_i\| = 1$，即 $\sum_{j=1}^{m} \boldsymbol{e}_{ij}^2 = 1$，其中 $\boldsymbol{e}_{ij}$ 表示向量 $\boldsymbol{e}_i$ 的第 j 个分量。

Step 3：计算主成分贡献率及累计贡献率。

贡献率的计算公式为

$$\frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^{n}\lambda_k} \quad (i = 1,2,\cdots,n)$$

累计贡献率的计算公式为

$$\frac{\sum_{k=1}^{i}\lambda_k}{\sum_{k=1}^{n}\lambda_k} \quad (i = 1,2,\cdots,n)$$

一般取累计贡献率达 85%～95%的特征值所对应的第一个、第二个……第 $p(p \leqslant n)$ 个主成分。

Step 4：计算主成分载荷

计算公式为

$$l_{ij} = p(z_i, x_j) = \sqrt{\lambda_i} e_{ij} \quad (i,j = 1,2,\cdots,m)$$

Step 5：各主成分的得分。

$$\boldsymbol{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1p} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mp} \end{bmatrix}$$

许多软件(数学处理软件如 Matlab、统计分析软件如 SPSS)等都有进行主成分分析的功能。

因子分析(factor analysis)是主成分分析的推广，它也是从研究相关矩阵内部的依赖关系出发，把一些具有错综复杂关系的变量归结为少数几个综合变量的一种多变量统计分析方法。即以最小的信息丢失，将原有的变量浓缩成几个因子变量，以及如何使因子变量具有较强的可解释性。因子分析的优点是所求因子比主成分更容易与客观现象挂钩，从而将定量分析与定性分析更好地结合起来，对事物做综合评价。存在的问题是综合评价的质量有可能下降，计算工作量增大。故一般情况下使用主成分分析法来进行综合评价就可以了，如果有其他特殊要求可使用因子分析法解决。

2. 聚类分析

聚类分析是综合评价的方法之一。从一批评价对象的评价指标中,找出能度量对象之间相似程度的统计量,构成一个对称的相似性矩阵。在此基础上,进一步寻找对象之间或对象组之间的相似程度,通过相似程度的大小,把评价对象逐一归类。关系密切的归类聚集到一个小的分类单位,关系疏远的聚集到一个大的分类单位,直到所有对象都聚集完毕,形成一个亲疏关系图,用以更自然和直观地显示分类对象的差异和联系。用于综合评价时,可按评价要求确定所需聚类的个数,如预定评价等级为优、良、中、差四级,则聚类分析聚成四类即可。更简单地说,倘若某对象和优秀者(如正理想点)聚成一类时,则对象应是比较优秀的;反之,若某对象与最差者(如负理想点)聚成一类时,该对象也比较差。

聚类分析的一般过程如下。

Step 1:将被评价的 m 个对象(样本)$\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{X}_2,\cdots,\boldsymbol{X}_m$ 看成 m 个类,此时类间的距离与样本之间的距离相等。将 $\boldsymbol{D}_0$ 记为初始距离矩阵。

Step 2:按照评价对象的评价指标体系的特征,选择适当的“距离”作为不相似度量,并找出相应的类间距离 D_{pq} 。

Step 3:将与 D_{pq} 对应的类合并成一类,即选择 $\boldsymbol{D}_0$ 中与 D_{pq} 对应的 G_p 与 G_q 合并为新类 G_r ,即 $G_r = G_r \cup G_r$ 。求出新类与其余类之间的距离 D_{rk} ,用 D_{rk} 代替 $\boldsymbol{D}_0$ 中的 p、q 行和 p、q 列,得到距离对称矩阵 $\boldsymbol{D}_1$,以此类推求解 $\boldsymbol{D}_w$,合并相应的类。

Step 4:重复 Step 3,直至所有类归为一类。或者在给定的聚类阈值 T 时,当 $D_{rk} \leqslant T$ 时聚类结束。

Step 5:在所取“距离”意义下画出相似性或相近程度联结的谱系图。

Step 6:按综合评价的精度要求,选择阈值,确定聚类结果并给出综合评价的结论。

样本与样本之间的距离常用闵可夫斯基距离。公式为

$$d_{ij}(p) = \left[\sum_{k=1}^{n} |x_{ik} - x_{jk}|^p\right]^{1/p}$$

$p=1$ 时,为海明距离。

$p=2$ 时，为欧氏距离。

$p=\infty$时，为车比雪夫距离，即

$$d_{ij}(\infty)=\max_{k=1,2,\cdots,n}\left|x_{ik}-x_{jk}\right|$$

类间距离的求解有以下几种方法。

(1) 最短距离法

计算公式为

$$D_{(0)}=(d_{ij})$$

$$D_{(pq)}=\min_{i\in Gp,j\in Gq}d_{ij}$$

$$D_{(rk)}=\min_{i\in Gr,j\in Gk}d_{ij}=\min\{\min_{i\in Gp,j\in Gk}d_{ij},\min_{i\in Gq,j\in Gk}d_{ij}\}=\min\{D_{(pk)},D_{(qk)}\}$$

(2) 最长距离法

计算公式为

$$D_{(0)}=(d_{ij})D_{(pq)}=\max_{i\in Gp,j\in Gq}d_{ij}$$

$$D_{(rk)}=\max_{i\in Gr,j\in Gk}d_{ij}=\max\{\max_{i\in Gp,j\in Gk}d_{ij},\max_{i\in Gq,j\in Gk}d_{ij}\}=\max\{D_{(pk)},D_{(qk)}\}$$

(3) 中间距离法

计算公式为

$$D_{(0)}=(d_{ij}^2)$$

$$D_{(pq)}=\max_{i\in Gp,j\in Gq}d_{ij}$$

$$D_{(rk)}=\frac{1}{2}D_{(pk)}^2+\frac{1}{2}D_{(qk)}^2-\frac{1}{4}D_{(pq)}^2$$

(4) 重心法

计算公式为

$$D_{(pq)}=d_{\bar{x}_p\bar{x}_q}$$

其中 $\bar{x}_p$ ，$\bar{x}_q$ 分别为 p、q 两类向量的均值向量。

$$D_{(rk)}=\frac{n_p}{n_r}D_{(pk)}^2+\frac{n_q}{n_r}D_{(qk)}^2-\frac{n_pn_q}{n_r^2}D_{(pq)}^2$$

其中，n_p，n_q和 n_r分别是 G_p，G_q和 G_r中样本数目。

(5) 类平均法

计算公式为

$$D_{(pq)}^2=\frac{1}{n_pn_q}\sum_{i\in G_p,j\in G_q}d_{ij}^2$$

$$D_{(rk)}^2=\frac{n_p}{n_r}D_{(pk)}^2+\frac{n_q}{n_r}D_{(qk)}^2$$

其中，n_p，n_q和n_r分别是G_p，G_q和G_r中样本数目。

（6）可变类平均法

计算公式为

$$D_{(pq)}^2=\frac{1}{n_pn_q}\sum_{i\in G_p,j\in G_q}d_{ij}^2$$

$$D_{(rk)}^2=\frac{n_p}{n_r}(1-\beta)D_{(pk)}^2+(1-\beta)\frac{n_q}{n_r}D_{(qk)}^2+\beta D_{(pq)}^2,\beta<1$$

其中，n_p，n_q和n_r分别是G_p，G_q和G_r中样本数目。

（7）可变法

计算公式为

$$D_{(pq)}^2=\frac{1}{n_pn_q}\sum_{i\in G_p,j\in G_q}d_{ij}^2$$

$$D_{(rk)}^2=\frac{1-\beta}{2}[D_{(pk)}^2+D_{(qk)}^2]+\beta D_{(pq)}^2,\beta<1$$

3. 专家评价

专家评价大多是通过对给定的表格打分进行评价的。因而在专家评价之前，首先必须运用量表设计的有关知识，设计好供专家打分的量表。由于试卷也可由多种不同类型的题目组成，每个题目属于不同类型的指标，因而也可认为是综合评价的一种，量表设计的有关方法也可用于试卷设计中。

量表是指根据特定的法则，把数值分派到受试者、事物或行为上，以测量其特征标志的程度的数量化工具。在测量中，我们按照一定的法则把数字、符号分派到测量对象中。然而，这些数字、符号能提供什么信息，除了取决于参照标准外，还取决于测量的尺度。测量的尺度是构成测量法则的重要因素。

测量的尺度就是指在测量过程中，按照法则所分派的符号、数字所能代表的事物某种特征的程度水平。一般分为四种不同水平的测量尺度，即类别、等级、等距、比率尺度。相应地运用四种不同类型的量表进行测量，即类别量表、等级量表、等

距量表和比率量表。

类别量表：只给出不分次序的类别、所测的一切只是分成两个或更多的类别，而这些类别只表明某一或某几种特征的不同，如个体的性别。

等级量表：除表明性质的不同，还根据高低、多少等特征排出次序。尽管测量值的顺序确定了，但还不能确定各测量值之间的距离可比关系，如对学校的态度。

等距量表：不仅给出了顺序，还确定了等距的单位。量表上某一部分测得的分类所反映的差异，与其他任一部分测得的分数都是相等的，如温度。

比率量表：除了等距，量表还含有真正的零点，表示测得的信息一点也没有，如校园网建设的经费开支。

以上这几种量表中，往往都要用数字来表示，根据尺度水平的不同，这些数字分别显示不同的功能。其中，最简单的量表是类别量表，它没有什么顺序，只是对个体进行简单的分类。个体的性别就是在类别量表中所要测量的变量。比率量表是四种量表中水平最高的层次，它包含的信息最多。

量表测量的结果是否能达到目的，是否能正确反映客观事实，通常以信度和效度这两个质量指标来衡量。

信度(reliability)就是测量可靠性的度量，它是用于鉴定测量结果的一致性和稳定性的，即量表的可靠性和稳定性，比如，用同一个量表测量同一被试对象，前后的结果是否一致，这便是信度问题。

效度就是测量有效性的度量，它是评价测量质量的一个重要指标。测量效度就是指测量的结果是否能真正反映测量的目标和意图。值得注意的是，效度是一个相对于一定目标的相对性概念，即使是相同的测量结果，随着目标的不同，其效度也随之而异。要提高测量的效度，在编制量表时，要避免题意不清或要求不明确而使受试者造成误解。

信度与效度二者既有联系又有区别，信度高，效度不一定高，效度高，则信度必定高，换句话说，可信的不一定是有效的，有效的则必是可信的。以尺量布，量了几次结果都一样，证明其信度高，但尺子若不符合标准，测量无效；若尺子是标准的，测量又有效，则无论测多少次，结果必定可信。在进行测量时，要尽量减少误差，使测量结果既有效又可信。

量表编制建构的基本步骤如下。

（1）编拟预试问卷。在预试问卷的编制或修订上，应从研究目的、相关文献数据与研究结构等方面加以考虑，如果有类似的研究工具，可根据当时的研究实际情形，加以修订、增删；如果是自己重新编制问卷，问卷内容应依据研究结构的层面加以编制。

（2）预试。预试问卷编拟完成后，应实施预试，预试对象的性质应与将来正式问卷要抽取的对象性质相同，如研究对象为中学生，则预试的受试者也应为中学生，预试对象人数以问卷中包括最多题项分别为 40 题、35 题、25 题，则预试对象最好在 120 位至 200 位中间，如果样本较为特殊，在预试人数的选取上可考虑再酌减一些。

（3）整理问卷与编号。问卷回收后，应一份一份检查筛选，对于数据不全或不诚实填答的问卷，应考虑将其删除；对于填答时皆填同一性答案者，是否删除，研究者应考虑问卷题项本身的内容与描述，自行审慎判断。

（4）筛选完后的问卷应加以编号，以便将来核对数据之用；之后再给予各变量、各题项一个不同代码，并依问卷内容，有顺序地键入计算机。

（5）项目分析。项目分析即在求出每一个题项的“临界比率”（critical ratio），简称 CR 值，其求法是将所有受试者在预试量表的得分总和依高低排列，得分前 25％～33％者为高分组，得分后 25％～33％者为低分组，求出高、低两组受试者在每题得分平均数差异的显著性检验（多数数据分析时，均以测验总分最高的 27％及最低的 27％，作为高低分组界限），如果题项的 CR 值达显著水准（$\alpha<0.05$ 或 $\alpha<0.01$），即表示这个题项能鉴别不同受试者的反应程度，此为题项是否删除首先要考虑的。

（6）因素分析。项目分析完成后，为检验量表的结构有效度（construct validity），应进行因素分析。所谓结构效度，是指态度量表能测量理论的概念或特质的程度。因素分析目的即在找出量表潜在的结构，减少题项的数目，使之变为一组较少而彼此相关较大的变量，此种因素分析方法是一种“探索性的因素分析”。

在实际教育技术研究中，量表有效性建构有时需要进行 2～3 次因素分析，因为部分量表在第一次因素分析时，因素层面所涵盖的题项内容差异太大，纳入同一层面，解释较不合理，因而可能需要删除部分题项，由于删除了题项，量表的效度要再重新建构。如果量表不采用结构效度检验方法，研究者亦可考虑采用其他效度分析法，如“内容效度”、“专家效度”、“效标关联效度”等。

（7）信度分析。因素分析完成后，要继续进行分析的是量表各层面与总量表的信度检验。

（8）再测信度。如果要继续求出量表的再测信度，要以正式量表对同一组受试者前后测验两次，根据受试者前后两次测验分数得分，求其积差相关系数。再测信度又称稳定系数，反映量表的稳定性与一致性程度，一般而言，间隔时间越长，稳定系数越低。

至于最后定稿的正式量表题项数应该为多少题最为适宜，实无一定而绝对的标准。就一般情形而论，若该份量表是测量一种“普通的”或多重向度的变量，其题数为 20～25 题，即已足够；若要测量的是特定的变量，以 7～10 题为宜；若每个量表包括不同因素层面之子量表时，每个子量表（因素层面）所包括的题项以 3～7 题较为适宜。

多个专家的权值的确定可仍参照前面介绍的方法进行处理。确定了权重后，数据的处理方法有几十种，即假设对某个指标，已知 n 个专家的分值（$x_1, x_2, \cdots, x_n$）和（$w_1, w_2, \cdots, w_n$）后，确定该指标的最终值的方法有几十种，如加权平均、有序加权平均、几何加权平均、有序几何加权平均等。当然，究竟哪一种方法较好，各种方法的适用场合和时机是什么，还未曾有相关的研究。

4. 动态综合评价

当人们拥有大量随时间顺序排列的平面数据表序列时，这样的一组按时间顺序排放的平面数据表序列称为时序立体数据表。这种根据时序立体数据表进行的评价就是动态评价。表 1-3 给出了 n 个评价对象、m 个评价指标、T 个时间顺序点的立体数据表。

表 1-3　立体数据表

系统	t_1	t_2	$\cdots$	t_T
	X_1　$X_2 \cdots X_m$	X_1　$X_2 \cdots X_m$	$\cdots$	X_1　$X_2 \cdots X_m$
S_1	$x_{11}(t_1)$ $x_{11}(t_1)$ $\cdots x_{11}(t_1)$	$x_{11}(t_1)$ $x_{11}(t_1)$ $\cdots x_{11}(t_1)$		$x_{11}(t_1)$ $x_{11}(t_1)$ $\cdots x_{11}(t_1)$
S_2	$x_{11}(t_1)$ $x_{11}(t_1)$ $\cdots x_{11}(t_1)$	$x_{11}(t_1)$ $x_{11}(t_1)$ $\cdots x_{11}(t_1)$	$\cdots$	$x_{11}(t_1)$ $x_{11}(t_1)$ $\cdots x_{11}(t_1)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
S_n	$x_{11}(t_1)$ $x_{11}(t_1)$ $\cdots x_{11}(t_1)$	$x_{11}(t_1)$ $x_{11}(t_1)$ $\cdots x_{11}(t_1)$		$x_{11}(t_1)$ $x_{11}(t_1)$ $\cdots x_{11}(t_1)$

此时有以下三种方法进行综合。

(1)二次综合法

该方法首先对某一时刻的值进行综合评价，然后对各个时刻点的综合评价值进行加权(二次)综合。二次综合时，按照越是近期的数据越被看重的原则进行加权。

$$y_i(t_k) = \sum_{j=1}^{n} w_j(t_k) x_{ij}(t_k)$$

式中，$y_i(t_k)$ 表示系统 s_i 在 t_k 时刻的综合评价值；$w_j(t_k)$ 表示第 j 项评价指标在 t_k 时的权重。

s_i 的综合评价值为

$$h_i = \sum_{k=1}^{T} \mathrm{e}^{\lambda t_k} y_j(t_k)$$

(2)置综合法

二次综合需要知道各时刻点各个评价指标的权重值。置综合法是根据各时刻点上某个指标数据的离散程度(方差)的大小来确定其权重。不妨假设表中数据已正规化，具体的步骤如下。

Step 1：计算对称矩阵。

$$\boldsymbol{H}_k = (\boldsymbol{X}(t_k))^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{X}(t_k)), \quad k=1,2,\cdots,T$$

Step2：计算对称矩阵。

$$\boldsymbol{H} = \sum_{k=1}^{T} (\boldsymbol{X}(t_k))^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{X}(t_k))$$

Step3：由二次规划计算权重向量 $\boldsymbol{W}$。

$$\max: \boldsymbol{W}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{H} \boldsymbol{W}$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \|\boldsymbol{W}\| = 1 \\ \boldsymbol{W} > 0 \end{cases}$$

Step4：得各时间点的评价值。

$$y_i(t_k) = \sum_{j=1}^{m} w_j x_{ij}(t_k)$$

(3)基于增量的动态综合评价方法

上述两种方法实际上没有考虑不同时段的增长情况，而对动态发展的评价，指标的增长程度是一个不可忽视的重要因素。故可以采用一种基于指标值和指标增

量的动态综合评价方法。其主要步骤如下。

Step1:计算指标增长系数矩阵。

$$\boldsymbol{B}_k = \boldsymbol{X}(t_{k+1}) - \boldsymbol{X}(t_k)$$

Step2:计算系统 s_i 的现值和增量值综合评价值。

$$f_i(t_k) = \sum_{j=1}^{n} w_j(t_k) x_{ij}(t_k)$$

$$g_i(t_k) = \sum_{j=1}^{n} w_j(t_k) B_{ij}(t_k)$$

评价系统 s_i 的评价值为

$$h_i(t_k) = \alpha f_i(t_k) + (1-\alpha) g_i(t_k) \quad (1 \geqslant \alpha \geqslant 0)$$

α 为调整系数,$\alpha = 1$ 时为不考虑增长时的评综合评价,$\alpha = 0$ 时为不考虑现值而仅考虑增量的评价。

三、评价方法的选择

在选择评价方法时应注意以下几个方面。

(1) 研究项目评价就是确定被评价项目在所在系统中的地位。这种地位是通过比较而认识的。由于比较的基准物不同,评价的内容和方法也就不同。

(2) 系统要保持其相对地位不变或提高其地位,必须具备动态调节的功能。这就要求所选择的评价方法必须具有良好的动态调节性能,使系统结构合理,且具有开放性。

(3) 评价具有主观性,评价是事物价值在人的意识中的反映。因此,对事物的评价要因人、因时、因环境而异,评价中的差异性是无法排除的,只能尽量缩小。在研究设计评价方法时,要使方法具有减弱或消除主观因素成分的功能,使要获得的评价信息具有可信性和可靠性。

(4) 认识是评价的前提和基础。认识的对象大于评价的对象。要提高评价方法的合理性与准确性,首先要全面客观地认识系统和环境,对事物的认识不准确,就难以做出合理的方法选择。

目前,人们在评价领域的认识已具有一定的优势,如已经形成了一套比较成熟的理论和方法。但也应清楚地看到,评价工作是一项跨学科、跨层次的综合性工

作，它既要求社会科学、经济学与自然科学的综合，又要求决策层、执行层与研究层的结合。这就对评价工作的组织管理与机制提出了特殊的要求。尽管学术界和理论工作者对评价理论和方法研究做了许多出色的努力，但由于缺乏对评价工作有效的组织，使得一些很好的评价方法难以发挥应有的作用。

为此，进一步对评价方法开展深入研究，并结合社会经济发展的实际情况开展评价理论和方法的实际应用，特别是不为方法而方法，而是根据评价实践中遇到的不同问题来选择不同的方法方面，还需要人们付出更大的努力。

四、确定评价结果

评价结果的可能形式有数值型、等级型、排序型。

数值型就是给一个综合评价评价值，客观存在是最基本的一种形式。等级型和排序型可依据数值型来确定。

等级型评价结果不看重具体评价数值的大小，而需要划分成若干档次。等级型评价可用聚类方法来进行。

排序型评价结果是最常用的一种评价方法。常用的层次分析法是确定排序结果的一种方法。

第五节　外军综合评价方法研究和应用的现状

现代西方国家提出“基于效果”的作战思想，美国人将这一战争理念上的革命称为新的战争哲学。对作战任务完成效果的综合评价是“基于效果”的作战的一个重要支撑。美军对效果评价研究的主要特点如下。

（1）在指导思想上，注重从终结性评价向形成性评价转变。

美军主张通过大量卓有成效的数据采集与分析工作，把评价的各项准备工作做细、做准、做实。

（2）在评价环节上，注意突出重点，以点带面、以点促面，推动评价工作质量的提高。

（3）在评价方法上，注意定性与定量相结合。

美军认为从定性到定量的发展是科学发展的一般规律，积极发展各种定量评价方法是提高评价准确性的途径。同时也要注意把定性和定量方法结合起来，根据实际情况灵活运用。

（4）在评价手段上，注意运用计算机系统来实施评价。

美军历来十分重视评价工作。从单件武器到武器系统的评价，从作战支持系统到作战方式效能的评价，从单个作战行动到整个战场毁伤的评价，美军都十分重视。



第二章 模糊评价方法

模糊数学是一门研究和处理模糊性现象的数学，是在美国控制论专家扎德（A. Zadeh）教授于1965年提出的模糊集合（fuzzy set）基础上发展起来的一门新兴的数学分支。经过多年的发展，这门学科在现实世界中的应用越来越广泛。

第一节　模糊数学基本知识

一、集合与特征函数

集合是现代数学中的一个重要概念。一般来说，具有某种属性的事物的全体或确定对象的汇总称为一个集合。不含任何元素的集合称为空集，记为 Φ。

由所研究的所有事物构成的集合称为全集，记为 Ω。若集合 $A \subseteq \Omega$，则将集合 $\{x \mid x \notin A, 且\ x \in \Omega\}$ 称为集合 A 的补集，记为 A^c。集合及其性质可用所谓特征函数来描述。

［**定义1**］　设 Ω 为全集，A 为 Ω 的子集，则集合 A 的特征函数指的是 Ω 到集合

$V = \{0,1\}$ 的一个映射 μ_A 。

$$\mu_A: \Omega \to V$$
$$x \to \mu_A(x)$$

其中对应规则 μ_A 满足

$$\mu_A = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases}$$

集合的特征函数具有以下性质：

(1) $\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$ ，记作 $\mu_A(x) \vee \mu_B(x)$ ；

(2) $\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$ ，记作 $\mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$ ；

(3) $\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$ 。

二、模糊集合

1. 模糊集合的概念

对于普通集合 A 及其余集 A^c ，任何元素 $x \in A$ 或 $x \in A^c$ ，二者必居其一，且仅居其一；用特征函数来表示就是 $\mu_A(x) = 0$ 或 $\mu(A) = 1$ 有且仅有一个成立。然而，客观世界中存在着大量的模糊概念，如“高个子”、“老年人”，这些概念无法用普通集合表示，因为这些概念与其对立面之间无法划出一条明确的分界线。为了研究和处理这类模糊概念（或现象），就需要把普通集合引申到模糊集合，用特征函数来描述就是将集合的特征函数的值域由 $\{0,1\}$ 两个数扩展到闭区间 $[0,1]$ ，这就是建立模糊集合的基本思想。

下面把所讨论对象的全体称为论域。

［**定义 2**］ 给定论域 U ，模糊集合 A 指的是论域 U 到区间 $[0,1]$ 的一个映射 μ_A 。

$$\mu_A: U \to [0,1]$$
$$x \to \mu_A(x)$$

对一切 $x \in U$ ，唯一确定实数 $\mu_A(x)$ ，使得 $0 \leqslant \mu_A(x) \leqslant 1$ ；用这个数表示 x 属于 A 的程度；其中映射函数 $\mu_A(\cdot)$ 称为 A 的隶属函数。而对于元素 x ，函数值 $\mu_A(x)$ 称为元素 x 关于 A 的隶属度。

$\mu_A(x) \equiv 0$ 表示模糊集合 $A = \Phi$ ，$\mu_A(x) \equiv 1$ 表示模糊集合 $A = U$ 。

由于模糊集合总是论域 U 的子集，故也称为模糊子集。模糊子集 A 通常记为 $\underset{\sim}{A}$ 。由于普通集合就是隶属函数值仅取 0 或 1 的特殊的模糊集合，为了方便起见，我们不加区别地采用大写字母 A,B,C 等表示模糊集合，其隶属函数一律记作 $\mu_A(x)$，$\mu_B(x)$ 等。

［**例 1**］　以年龄作为论域 U，取 $U=[0,100]$，模糊集合 A 与 B 分别表示概念"老年人"和"年轻人"，取隶属函数为

$$\mu_A(x)=\begin{cases}0 & (0\leqslant x\leqslant 50)\\ \dfrac{1}{1+\left(\dfrac{x-50}{5}\right)^{-2}} & (50<x\leqslant 100)\end{cases}$$

$$\mu_B(x)=\begin{cases}1 & (0\leqslant x\leqslant 25)\\ \dfrac{1}{1+\left(\dfrac{x-25}{5}\right)^{-2}} & (25<x\leqslant 100)\end{cases}$$

隶属函数和隶属度是模糊数学中的重要概念，隶属函数不是唯一的，如关于"老年人"的隶属函数也可以取为

$$\mu_A(x)=\begin{cases}0 & (0\leqslant x\leqslant 50)\\ \dfrac{x-50}{20} & (50<x<70)\\ 1 & (x\geqslant 70)\end{cases}$$

2. 模糊集合的表示方法

设论域为 U，则模糊集合 A 可表示为

$$A=\bigcup_{x\in U}\mu_A(x)/x$$

其中，"/"不表示除法运算，仅表示 x 为元素，$\mu_A(x)$ 为 x 的隶属度。

若论域 U 为有限论域；即设 $U=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$，则 A 还可以表示为

(1) $A=\dfrac{\mu_A(x_1)}{x_1}+\dfrac{\mu_A(x_2)}{x_2}+\cdots+\dfrac{\mu_A(x_n)}{x_n}$

同样，加号与除号仅是一种记号，并不表示加、除运算。

(2) $A=\{\mu_A(x_1),\mu_A(x_2),\cdots,\mu_A(x_n)\}$ 称为向量表示法。一般地，当 $\mu_i\in[0,1]$ $(i=1,2,\cdots,n)$ 时，称 $(\mu_1,\mu_2,\cdots,\mu_n)$ 为模糊向量。

3. 模糊集合的运算

［**定义 3**］ 设论域为 U，U 的所有模糊集合作为元素构成的普通集合称为 U 的模糊幂集，记为 $P(U)$。

［**定义 4**］ 设论域为 U，A 和 B 是 U 的模糊集合，即 $A \in P(U)$，$B \in P(U)$。如果对一切 $x \in U$ 有 $\mu_A(x) \leqslant \mu_B(x)$，则称模糊集合 B 包含 A，记为 $A \subseteq B$；如果对一切 $x \in U$，有 $\mu_A(x) = \mu_B(x)$，则称 A 与 B 相等，记为 $A = B$。

［**定义 5**］ 设论域为 U，A 和 B 是 U 的模糊集合，即 $A \in P(U)$，$A \in P(U)$。它们的隶属函数分别为 $\mu_A(x)$ 和 $\mu_B(x)$。A 与 B 的并集是 U 的模糊集合，记为 $A \cup B$，其隶属函数为

$$\mu_{A\cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$$

A 与 B 的交集是 U 的模糊集合，记为 $A \cap B$，其隶属函数为

$$\mu_{A\cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$$

A 的余集是 U 的一个模糊集合，记为 A^c，其隶属函数为

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

其中，“ $\vee$ ”和“ $\wedge$ ”是取“最大”与“最小”的意思。

［**定义 6**］ 设论域为 U，A 是 U 的模糊集合，$\lambda \in R$，且 $0 < \lambda < 1$，令

$$A_\lambda = \{x \mid x \in U, \mu_A(x) \geqslant \lambda\}$$

则称 A_λ 为 A 的一个 $\lambda-$截集，其中 λ 称为阈值或置信水平。

由定义可知，A 的 $\lambda-$截集 A_λ 就是 U 中所有对 A 的隶属度大于或等于 λ 的全体元素组成的普通集合。

［**例 2**］ 设论域 $U = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$，$A = \frac{0.7}{x_1} + \frac{0.9}{x_2} + \frac{0.2}{x_3} + \frac{1}{x_4} + \frac{0.5}{x_5}$，则 $A_{0.4} = \{x_1, x_2, x_4, x_5\}$，$A_{0.8} = \{x_2, x_4\}$。

［**定义 7**］ 设论域为 U，A 为 U 的模糊集合，$0 \leqslant \lambda \leqslant 1$，$\lambda$ 与 A 的模糊截积记为 λA，其隶属函数为 $\mu_{\lambda A}(x) = \lambda \wedge \lambda_A(x)$。

特别地，当 A 为普通集合时，有

$$\mu_{\lambda A}(x) = \begin{cases} \lambda & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases}$$

模糊截积具有以下性质：

$$\lambda_1 \leqslant \lambda_2 \Rightarrow \lambda_1 A \subseteq \lambda_2 A$$

三、模糊矩阵

［**定义 8**］ 称 $\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{n\times m}$ 为模糊矩阵,如果对一切 $i=1,2,\cdots,n$, $j=1,2,\cdots,m$ 有 $0\leqslant r_{ij}\leqslant 1$ 。当 r_{ij} 仅取 0 或 1 时, $\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{n\times m}$ 为布尔矩阵。

［**定义 9**］ 设 $\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{n\times m}$ 和 $\boldsymbol{S}=(s_{ij})_{n\times m}$ 为两模糊矩阵,如果对一切 i,j 有 $r_{ij}=s_{ij}$,则称 $\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{S}$ 相等,记为 $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{S}$;如果对一切 i,j 有 $r_{ij}\leqslant s_{ij}$,则称 $\boldsymbol{S}$ 包含 $\boldsymbol{R}$,记为 $\boldsymbol{R}\subseteq\boldsymbol{S}$。

［**定义 10**］ 设 $\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{n\times m}$ 和 $\boldsymbol{S}=(s_{ij})_{n\times m}$ 为两模糊矩阵,则 $\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{S}$ 的并定义为 $\boldsymbol{R}\cup\boldsymbol{S}=(r_{ij}\vee s_{ij})_{n\times m}$,$\boldsymbol{R}$ 与 $\boldsymbol{S}$ 的交 $\boldsymbol{R}\cap\boldsymbol{S}=(r_{ij}\wedge s_{ij})_{n\times m}$ 。

［**定义 11**］ 设 $\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{n\times m}$ 为模糊矩阵, $0\leqslant\lambda\leqslant 1$,令

$$r_{ij}^{\lambda}=\begin{cases}1 & r_{ij}\geqslant\lambda\\ 0 & r_{ij}<\lambda\end{cases}$$

则称布尔矩阵 $(r_{ij}^{\lambda})_{n\times m}$ 为 $\boldsymbol{R}$ 的 λ—截矩阵,记为 $\boldsymbol{R}_{\lambda}$ 。

例如

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0.8 & 0.7 & 0.5 & 0.3\\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0.2\\ 0.1 & 0 & 0.3 & 0.9\end{bmatrix}$$

则

$$\boldsymbol{R}_{0.5}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

［**定义 12**］ 模糊矩阵 $\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{n\times m}$ 与 $\boldsymbol{Q}=(q_{jk})_{m\times l}$ 的合成是一个 n 行 l 列的模糊矩阵 $\boldsymbol{S}=(s_{ik})_{n\times l}$,记为 $\boldsymbol{S}=\boldsymbol{R}\circ\boldsymbol{Q}$,其中, $s_{ik}=\bigvee_{j=1}^{m}(r_{ij}\wedge q_{jk})$ $(i=1,\cdots,n,k=1,\cdots,l)$,$\boldsymbol{S}$ 又称为 $\boldsymbol{R}$ 与 $\boldsymbol{Q}$ 的模糊乘积。

［**例 3**］ 设模糊矩阵

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0.7 & 0.5 & 0.1\\ 0.4 & 0.6 & 0.7\end{bmatrix},\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}0.8 & 0.6\\ 0.1 & 0\\ 0.7 & 0.4\end{bmatrix}$$

则

$$\boldsymbol{R}\circ\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}0.7 & 0.5 & 0.1\\ 0.4 & 0.6 & 0.7\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0.8 & 0.6\\ 0.1 & 0\\ 0.7 & 0.4\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}(0.7\wedge 0.8)\vee(0.5\wedge 0.1)\vee(0.1\wedge 0.7) & (0.7\wedge 0.6)\vee(0.5\wedge 0)\vee(0.1\wedge 0.4)\\ (0.4\wedge 0.8)\vee(0.6\wedge 0.1)\vee(0.7\wedge 0.7) & (0.4\wedge 0.6)\vee(0.6\wedge 0)\vee(0.7\wedge 0.4)\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}0.7\vee 0.1\vee 0.1 & 0.6\vee 0\vee 0.1\\ 0.4\vee 0.1\vee 0.7 & 0.4\vee 0\vee 0.4\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.7 & 0.6\\ 0.7 & 0.4\end{bmatrix}$$

四、模糊关系及其合成运算

两个非空子集 U 与 V 的笛卡儿乘积定义为一个关系：

$$U\times V=\{(u,v)\mid u\in U,v\in V\}$$

$U\times V$ 的子集称为 U 到 V 的一个关系，记为 $U\xrightarrow{\boldsymbol{R}}\boldsymbol{V}$ 。

当 $(u,v)\in\boldsymbol{R}$ 时，则称 u 与 v 有关系 $\boldsymbol{R}$，记为 $u\boldsymbol{R}v$ ，否则称 u 与 v 没有关系。

［**定义 13**］ 设 U,V 为两非空集合，以 $U\times V$ 为论域的模糊集合 $\underset{\sim}{\boldsymbol{R}}$ 确定 U 到 V 的一个模糊关系，记作 $U\xrightarrow{\underset{\sim}{\boldsymbol{R}}}$ ，其中对任意 $(u,v)\in U\times V$ ，(u,v) 关于模糊集合 $\underset{\sim}{\boldsymbol{R}}$ 的隶属度记为 $\mu_{\underset{\sim}{R}}(u,v)$ ，它表示 u 与 v 关于模糊关系的相关程度，记为 $\underset{\sim}{R}(\mu,u)$ 。特别地，当 $\underset{\sim}{R}(u,v)$ 的值仅取 0 或 1 时，$\underset{\sim}{R}$ 就是 U 到 V 的普通关系。所以普通关系是模糊关系的特殊情况，因此不加区别地用 R,S,T 等表示模糊关系，并且将模糊集合的隶属函数称为模糊关系的隶属函数，记为 $R(u,v)$， $S(\mu,u)$，$T(\mu,u)$ 。

模糊关系可以用模糊矩阵来表示，即

［**定义 14**］ 设 $\boldsymbol{U}=\{u_1,u_2,\cdots,u_n\}$ ，$\boldsymbol{V}=\{v_1,v_2,\cdots,v_m\}$ 都是有限论域，$\boldsymbol{U}$ 到 $\boldsymbol{V}$ 的模糊关系为 $\boldsymbol{U}\xrightarrow{\boldsymbol{R}}\boldsymbol{V}$ ，对一切 $i(i=1,\cdots,n)$ ，$j(j=1,\cdots,m)$ ，令 $r_{ij}=R(u_i,$

v_j),则称模糊矩阵$(r_{ij})_{n\times m}$为模糊关系 $\boldsymbol{R}$ 的矩阵表示,在不出现混淆的情况下仍记为 $\boldsymbol{R}$。

模糊关系存在合成运算。

[**定义 15**] 设 $\boldsymbol{U},\boldsymbol{V},\boldsymbol{W}$ 为三个非空集合,$\boldsymbol{U}$ 到 $\boldsymbol{V}$ 的模糊关系 $\boldsymbol{R}$ 与 $\boldsymbol{V}$ 到 $\boldsymbol{W}$ 的模糊关系 $\boldsymbol{S}$ 的合成是一个 $\boldsymbol{U}$ 到 $\boldsymbol{W}$ 的模糊关系 $\boldsymbol{T}$,记作 $\boldsymbol{T}=\boldsymbol{R}\circ\boldsymbol{S}$,其中对一切 $(\boldsymbol{u},\boldsymbol{w})\in\boldsymbol{U}\times\boldsymbol{W}$ 有

$$\boldsymbol{T}(\boldsymbol{u},\boldsymbol{w})=\bigvee_{v\in V}[\boldsymbol{R}(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v})\wedge\boldsymbol{S}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{w})]$$

[**定理 1**] 设 $\boldsymbol{U}=\{\boldsymbol{u}_1,\cdots,\boldsymbol{u}_n\}$,$\boldsymbol{V}=\{v_1,\cdots,v_m\}$ 和 $\boldsymbol{W}=\{w_1,\cdots,w_l\}$ 是三个有限论域,模糊关系为 $\boldsymbol{U}\xrightarrow{\boldsymbol{R}}\boldsymbol{V}$,$\boldsymbol{V}\xrightarrow{\boldsymbol{S}}\boldsymbol{W}$ 的矩阵表示分别为 $\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{n\times m}$,$\boldsymbol{S}=(s_{jk})_{m\times l}$,则模糊关系 $\boldsymbol{U}\xrightarrow{\boldsymbol{R}\circ\boldsymbol{S}}\boldsymbol{W}$ 的矩阵表示就是模糊矩阵 $(r_{ij})_{n\times m}$ 与 $(s_{jk})_{m\times l}$ 的合成。

[**定理 2**] 设 $\boldsymbol{U}$ 和 $\boldsymbol{V}$ 为两个非空集合,$\boldsymbol{R}$ 为 $\boldsymbol{U}$ 到 $\boldsymbol{V}$ 的模糊关系,对任意 $0\leqslant\lambda\leqslant1$ 可以唯一确定 $\boldsymbol{U}$ 到 $\boldsymbol{V}$ 的普通关系 $\boldsymbol{R}_\lambda$,其中对一切 $(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v})\in\boldsymbol{U}\times\boldsymbol{V}$,当且仅当 $\boldsymbol{R}(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v})\geqslant\lambda$ 时,有 $(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v})\in\boldsymbol{R}_\lambda$,即

$$\boldsymbol{R}_\lambda(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v})=\begin{cases}1 & \boldsymbol{R}(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v})\geqslant\lambda\\0 & \boldsymbol{R}(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v})<\lambda\end{cases}$$

则称 $\boldsymbol{R}_\lambda$ 为 $\boldsymbol{R}$ 的 λ-截关系。

λ-截关系可以用 λ-截矩阵表示。

第二节　模糊识别问题

实际工作中有这样一类问题,已知若干个相互之间不分明的模糊概念,需要判断某个确定事物用哪一个模糊概念来反映更合理、准确,这就是模糊模式识别的问题。这类问题的特点是:几个模型是模糊的,而待识别对象是明确的。这类问题的一般提法是:已知论域 U 的若干个模糊集合 $A_1,A_2,\cdots,A_n$,对于 U 的某个特定元

素 x_0 ,判定 x_0 相对隶属于哪一个模糊集合。

一、最大隶属原则

以上提到的识别问题,通常可以用最大隶属原则识别。

最大隶属原则:设论域为 U ,$A_1,A_2,\cdots,A_n$ 是 U 的 n 个模糊集合,对于 $x_0 \in U$,如果

$$\mu_{A_k}(x_0) = \max\{\mu_{A_1}(x_0),\cdots,\mu_{A_n}(x_0)\},\ 1 \leqslant k \leqslant n$$

则可以认为 x_0 相对隶属于 A_k 。

二、阈值原则

在识别问题中还会出现以下两种情况:一是待识别对象 x_0 关于模糊集合 A_1,$A_2,\cdots,A_n$ 中的每一个的隶属度都相对较低,这说明模糊集合对元素 x_0 不能识别;二是有时待识别对象关于模糊集合若干个的隶属程度都相对较高,这时还可以缩小 x_0 的识别范围。可采取如下阈值原则:

阈值原则:设论域为 U ,$A_1,A_2,\cdots,A_n$ 是 U 的 n 个模糊集合。给定一个阈值(或称置信水平)$\alpha\ (0<\alpha<1)$,对一切 $1\leqslant i\leqslant n$,如果有 $\mu_{A_i}(x_0)\leqslant\alpha$,则认为 x_0 不属于任何一模糊集合,即不能识别;如果存在某些 k ,使得 $\mu_{A_k}(x_0)>\alpha$,则令 B 是所有满足 $\mu_{A_k}(x_0)>\alpha$ 的模糊集合的 A_k 的交,即

$$B = \bigcap_{\mu_{A_k}(x_0)>\alpha} A_k$$

则认为 x_0 相对隶属于模糊集合 B 。

三、择近原则

实际工作中还有一类识别问题。设论域为 U ,已知 U 的 n 个模糊集合 A_1,$A_2,\cdots,A_n$,B 是 U 的另一个模糊集合,要判断 B 与 $A_1,A_2,\cdots,A_n$ 中的哪一个最接近。这类问题的特点是:模型是模糊的,待识别对象也是模糊的。这类问题可以采

用择近原则来识别。

［**定义 16**］　设论域为 U，A,B 为 U 的模糊集合，定义 $\bigvee_{x\in U}[\mu_A(x)\wedge\mu_B(x)]$ 为 A 与 B 的内积，记作 $A\odot B$；数值 $\bigwedge_{x\in U}[\mu_A(x)\vee\mu_B(x)]$ 为 A 与 B 的外积，记作 $A\otimes B$。特别地，当 $\boldsymbol{A}=(a_1,\cdots,a_n)$ 和 $\boldsymbol{B}=(b_1,\cdots,b_n)$ 是两个模糊向量时，则

$$\boldsymbol{A}\odot\boldsymbol{B}=\bigvee_{i=1}^{n}(a_i\wedge b_i),\boldsymbol{A}\otimes\boldsymbol{B}=\bigwedge_{i=1}^{n}(a_i\vee b_i)$$

［**定义 17**］　设论域为 U，A,B 为 U 的模糊集合，称 $(A\odot B)\wedge(A\otimes B)^c$ 为 A 与 B 的格贴近度，记作 (A,B)。

格贴近度具有以下性质：

(1) $0\leqslant(A,B)\leqslant 1$；

(2) $(A,A)=1-\overline{A}\wedge(1-\underline{A})$，其中 $\overline{A}=\bigvee_{i=1}^{n}a_i$，$\underline{A}=\bigwedge_{i=1}^{n}a_i$；

(3) $A\subseteq B\subseteq C$，则 $(A,C)\leqslant(A,B)\wedge(B,C)$。

［**定义 18**］　设论域为 U，σ 为笛卡儿积 $P(U)\times P(U)$ 到区间 $[0,1]$ 的映射

$$\sigma:P(U)\times P(U)\rightarrow[0,1]$$

$$(A,B)\rightarrow\sigma(A,B)\in[0,1]$$

如果 σ 满足

(1) $\sigma(A,B)=\sigma(B,A)$；

(2) $A=B$ 时，有 $\sigma(A,B)=1$；

(3) $A\subseteq B\subseteq C$ 时，有 $\sigma(A,C)\leqslant\sigma(A,B)\wedge\sigma(B,C)$；

则称映射 σ 为 U 的模糊集合的贴近度。这里 $P(U)$ 是 U 的模糊幂集，即 $P(U)$ 是 U 的所有模糊集合为元素构成的普通集合。

择近原则：设论域为 U，已知模糊集合 $A_1,A_2,\cdots,A_n$ 和模糊集合 B，σ 是 U 的模糊集合的贴近度。如果

$$\sigma(B,A_k)=\max_{1\leqslant i\leqslant n}\{\sigma(B,A_i)\}$$

则可以认为模糊集合 B 与 A_k 最接近。

四、模糊相似选择

按照某种性质对一组事物或对象排序是一类常见的问题，在许多情况下，由于

用来比较的性质具有边界不分明的模糊性，往往给比较和排序带来困难。例如，对企业综合效益的评比排序，由于综合效益包括经济效益、社会效益、环境效益等几个方面，每一方面又包括很多综合指标，直接排序困难较大。在此情况下如何确定整体上的优劣次序呢？这就是模糊相似选择要解决的问题。

［**定义 19**］ 设 $\boldsymbol{U}=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$ 是有限论域，$\boldsymbol{R}$ 是 $\boldsymbol{U}$ 到 $\boldsymbol{U}$ 的模糊关系为 $\boldsymbol{U}\xrightarrow{\boldsymbol{R}}\boldsymbol{U}$，如果 $\boldsymbol{R}$ 的隶属函数满足以下条件：

（1）对一切 $x_i\in\boldsymbol{U}$，$\boldsymbol{R}(x_i,x_i)=0.5$；

（2）对一切 $x_i,x_j\in\boldsymbol{U}$，$\boldsymbol{R}(x_i,x_j)+\boldsymbol{R}(x_j,x_i)=1$；

则称 $\boldsymbol{R}$ 为 $\boldsymbol{U}$ 的一个模糊选择关系，$\boldsymbol{R}$ 的矩阵表示 $(r_{ij})_{n\times n}$ 被称为 $\boldsymbol{U}$ 的一个模糊选择矩阵，其中

$$\boldsymbol{r_{ij}}=\boldsymbol{R}(x_i,x_j),\quad i=1,2,\cdots,n;\ j=1,2,\cdots,n$$

一般将模糊选择关系 $\boldsymbol{R}$ 的矩阵表示也记作 $\boldsymbol{R}$。

模糊选择关系中 $\boldsymbol{R}(x_i,x_i)=r_{ii}=0.5$ 表示与自身相比较具有相同的优越性，而 $\boldsymbol{R}(x_i,x_j)+\boldsymbol{R}(x_j,x_i)=r_{ij}+r_{ji}=1$ 表示 x_i 优于 x_j 的程度与 x_j 优于 x_i 的程度之和为 1。

在 $\boldsymbol{U}$ 的模糊选择矩阵 $\boldsymbol{R}$ 中将对角线上的 0.5 换为 0 后得到矩阵记为 $\bar{\boldsymbol{R}}$，仍称为模糊选择矩阵。

模糊相似选择的过程如下。

利用 $\boldsymbol{U}$ 的模糊选择矩阵 $\boldsymbol{R}$，可以将 $\boldsymbol{U}$ 中的元素排出一个整体优劣次序。方法如下。

（1）确定 $\boldsymbol{U}$ 上模糊选择矩阵 $\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{n\times n}$，其中 r_{ij} 表示 x_i 优于 x_j 的程度。

当 $r_{ij}=1$ 时，表示 x_i 绝对优于 x_j；

当 $0.5<r_{ij}<1$ 时，表示 x_i 相对优于 x_j；

当 $r_{ij}=0.5$ 时，表示两者优越度相同；

当 $0<r_{ij}<0.5$ 时，表示 x_i 相对不优于 x_j；

当 $r_{ij}=0$ 时，表示 x_i 绝对不优于 x_j。

（2）写出模糊选择矩阵 $\bar{\boldsymbol{R}}$，再取一组 λ，$0<\lambda<1$，对这组 λ 从大到小写出 $\bar{\boldsymbol{R}}$ 的 λ－截矩阵 $\bar{\boldsymbol{R}}_\lambda$。

（3）当 λ 下降到某一数值时，第一次出现 $\bar{\boldsymbol{R}}_\lambda$ 中某一行除主对角线外全是 1，那么可以认为该行所对应元素 x_k 是 $\boldsymbol{U}$ 中相对最优元素。

(4) 划去 $\bar{\boldsymbol{R}}$ 中第 k 行第 k 列元素后得到一个 $n-1$ 阶矩阵,记作 $\bar{\boldsymbol{R}}^{(1)}$,显然 $\bar{\boldsymbol{R}}^{(1)}$ 是 $\boldsymbol{U}$ 中去掉 x_k 后的 $n-1$ 个元素为论域的一个模糊选择矩阵,对 $\bar{\boldsymbol{R}}^{(1)}$ 重复以上(2)、(3)的过程得 $\boldsymbol{U}$ 中相对第二优越元素。

(5) 将以上过程依次重复,最终可在 U 中确定一个整体上的相对优劣次序。

以上排序方法是在建立模糊选择矩阵后进行的,下面给出建立模糊选择矩阵的一种方法。

设 $A_1,A_2,\cdots,A_k$ 是论域 $\boldsymbol{U}=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$ 的 k 个模糊集合;对于样本确定的某一 A_0,与 A_0 相比较可以将 $A_1,A_2,\cdots,A_k$ 进行选择排序。

首先,对于任意两模糊集合

$$\boldsymbol{A}=\frac{a_1}{x_1}+\frac{a_2}{x_2}+\cdots+\frac{a_n}{x_n}$$

$$\boldsymbol{B}=\frac{b_1}{x_1}+\frac{b_2}{x_2}+\cdots+\frac{b_n}{x_n}$$

[**定义 20**]$\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 的相对线性距离为 $d(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|a_i-b_i|$。

再令 $d_i=d(A_i,A_0)$,$i=1,2,\cdots,k$ 表示 A_i 与 A_0 的相对线性距离,令

$$r_{ij}=\frac{d_j}{d_i+d_j},\ r_{ji}=\frac{d_i}{d_i+d_j}=1-r_{ij},\ i,j=1,2,\cdots,k$$

这样就建立了关于模糊集合 $A_1,A_2,\cdots,A_k$ 的模糊选择矩阵 $\boldsymbol{R}=(\boldsymbol{r_{ij}})_{n\times n}$。

[**例 4**] 现有 5 个等级的装备样品 A_1,A_2,A_3,A_4,A_5,待识别装备 B。反映装备质量的因素有 6 项指标,构成论域 $\boldsymbol{U}$,其中

$\boldsymbol{U}=\{x_1$(射击精度),x_2(杀伤力),x_3(机动性),x_4(射程),x_5(重量),x_6(隐身性能)$\}$

设五个等级的样品对 6 项指标的数值为:

$A_1=(0.5,0.4,0.3,0.6,0.5,0.4)$

$A_2=(0.3,0.2,0.2,0.1,0.2,0.2)$

$A_3=(0.2,0.2,0.2,0.1,0.1,0.2)$

$A_4=(0,0.1,0.2,0.1,0.1,0.1)$

$A_5=(0,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1)$

待识别装备的各项指标值为:

$B=(0.4,0.2,0.1,0.4,0.5,0.6)$

为确定 B 的属类，先计算 B 与 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 的格贴近度。

［**解**］ 编写程序如下：

```
a=[0.5 0.4 0.3 0.6 0.5 0.4
   0.3 0.2 0.2 0.1 0.2 0.2
   0.2 0.2 0.2 0.1 0.1 0.2
   0 0.1 0.2 0.1 0.1 0.1
   0 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1];
b=[0.4 0.2 0.1 0.4 0.5 0.6];
for i=1:5
   x=[a(i,:);b];
   t(i)=min([max(min(x)) 1-min(max(x))]);
end
t
```

计算结果为

$(A_1,B)=0.5$，$(A_2,B)=0.3$，$(A_3,B)=0.2$，$(A_4,B)=0.1$，$(A_5,B)=0.1$

根据择近原则，可以将 B 定为一级装备（与 A_1 同属一类）。

［**例 5**］ 最佳方案的模糊决策

某露天煤矿有 5 个边坡设计方案，其各项参数根据分析计算结果得到边坡设计方案的参数如表 2-1 所示。

表 2-1　边坡设计方案

项　　目	方案Ⅰ	方案Ⅱ	方案Ⅲ	方案Ⅳ	方案Ⅴ
可采矿量/万 t	4 700	6 700	5 900	8 800	7 600
基建投资/万元	5 000	5 500	5 300	6 800	6 000
采矿成本/(元/t)	4.0	6.1	5.5	7.0	6.8
不稳定费用/万元	30	50	40	200	160
净现值/万元	1 500	700	1 000	50	100

据勘探该矿探明储量 8 800t，开采总投资不超过 8 000 万元，试做出各方案的优劣排序，选出最佳方案。

［**解**］ 首先确定隶属函数。

(1)可采矿量的隶属函数。

因为勘探的地质储量为 8 800t,故可用资源的利用函数作为隶属函数。

$$\mu_A(x) = \frac{x}{8\ 800}$$

(2)投资约束是 8 000 万元,所以 $\mu_B(x) = -\frac{x}{8\ 000} + 1$ 。

(3)根据专家意见,采矿成本 $a_1 \leqslant 5.5$ 元/t 为低成本,$a_2 = 8.0$ 元/t 为高成本,故

$$\mu_C(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leqslant x \leqslant a_1 \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1}, & a_1 \leqslant x \leqslant a_2 \\ 0, & a_2 < x \end{cases}$$

(4)不稳定费用的隶属函数为 $\mu_D(x) = 1 - \frac{x}{200}$ 。

(5)净现值的隶属函数。取上限 15(百万元)、下限 0.5(百万元),采用线性隶属函数

$$\mu_E(x) = \frac{1}{14.5}(x - 0.5)$$

根据各隶属函数计算出五个方案所对应的不同隶属度,如表 2-2 所示。

表 2-2 方案所对应的不同隶属度

项目	方案Ⅰ	方案Ⅱ	方案Ⅲ	方案Ⅳ	方案Ⅴ
可采矿量	0.534 1	0.761 4	0.670 5	1	0.863 6
基建投资	0.375 0	0.312 5	0.337 5	0.15	0.25
采矿成本	1	0.76	1	0.4	0.48
不稳定费用	0.85	0.75	0.8	0	0.2
净现值	1	0.448 0	0.655 2	0	0.034 5

这样就决定了模糊关系矩阵:

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} 0.534\ 1 & 0.761\ 4 & 0.670\ 5 & 1 & 0.863\ 6 \\ 0.375\ 0 & 0.312\ 5 & 0.337\ 5 & 0.15 & 0.25 \\ 1 & 0.76 & 1 & 0.4 & 0.48 \\ 0.85 & 0.75 & 0.8 & 0 & 0.2 \\ 1 & 0.448\ 0 & 0.655\ 2 & 0 & 0.034\ 5 \end{bmatrix}$$

根据专家评价，诸项目在决策中占的权重为 $\boldsymbol{A}=(0.25,0.20,0.20,0.10,0.25)$，于是得诸方案的综合评价为：

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{A}\circ\boldsymbol{R}=(0.7435,0.5919,0.6789,0.3600,0.3905)$$

由此可知：方案Ⅰ最佳，方案Ⅲ次之，方案Ⅳ最差。

程序计算如下：

(1)首先编写函数文件 fun.m 如下：

```
function f = fun(x);
    f(1,:) = x(1,:)/8800;
    f(2,:) = 1 - x(2,:)/8000;
    f(3,:) = 0;
    f(3,find(x(3,:)<=5.5)) = 1;
    flag = find(x(3,:)>5.5 & x(3,:)<=8);
    f(3,flag) = (8 - x(3,flag))/2.5;
    f(4,:) = 1 - x(4,:)/200;
    f(5,:) = (x(5,:) - 50)/1450;
```

(2)编写程序文件如下：

```
x = [4700 6700 5900 8800 7600
    5000 5500 5300 6800 6000
    4.0 6.1 5.5 7.0 6.8
    30 50 40 200 160
    1500 700 1000 50 100];
    r = myfun(x);
    a = [0.25,0.20,0.20,0.10,0.25];
    b = a * r
```

案例1　基于“五力”的武器装备作战能力模糊聚类评价模型

武器装备是用以实施和保障军事行动的武器、武器系统和其他军事技术器材

的统称，主要是指武器力量编制内的武器、弹药、车辆、机械、器材等。武器装备是赢得现代战争胜利的重要物质基础，是关系军事斗争成败的重要因素，而对武器装备的合理评价是武器装备发展规划，列装使用的科学依据。

一、模糊聚类评价模型

如何综合评价武器装备的作战能力是作战模拟中必须面对的问题，我们认为武器装备作战能力包含以下五个主要要素，即打击力、防护力、机动力、信息力和保障力，简称为“五力”。这里，给出它们的一般性描述定义如下。

(1) 打击力，即武器装备通过弹药(包括射弹与定向能)用于主动对目标打击所产生的杀伤力和破坏力。

(2) 机动力，即武器装备利用机械能(或其他人力或畜力之外的能量)提供运动、产生位移的能力。

(3) 防护力，即武器装备通过弹药(包括射弹与定向能)用于以防护自身(或目标)对来袭兵器进行打击所产生的杀伤力，也包括装备自身以装甲或其他设施(包括隐身)形成的具有的抗(防)打击的能力。

(4) 信息力，即武器装备所具有的信息获取、传输和处理能力。

(5) 保障力，即武器装备自身所具有的提供持续作战、遭损后能够修复的能力。

对于武器装备作战能力评价，其效能指标体系以及效能指标数值的分类范围，可以通过定性分析和适当的计算事先设定。主要问题是检测性能指标值属于哪一类别，为此采用隶属度函数聚类的方法进行评价。同时，由于表现作战效能的指标多样性，且意义不同，量纲不同，指标数值的数量悬殊，在这种情况下，解决这一问题可通过对各聚类指标先赋权。

对于几种武器装备的作战能力模糊聚类评价，可以看成 n 个评价对象，m 个评价指标，s 个不同类，根据对象 i 关于指标 j 的样本观测值，对相应的对象 i 进行评价的问题。

具体步骤如下。

(1) 根据定性分析，确定效能指标体系和各指标在指标体系中的权重。

(2) 按照评价要求选取阈值。

设按照评价要求所需划分的类数为 s，将各指标的取值范围也相应地划分为 s 个类，例如，将 j 指标的取值范围 $[a_1,a_{s+1}]$ 划分为

$$[a_1,a_2],[a_2,a_3],\cdots,[a_{k-1},a_k],\cdots,[a_{s-1},a_s],[a_s,a_{s+1}]$$

其中，阈值 $a_k(k=1,2,3,\cdots,s)$ 的值可根据实际问题的要求或定性研究结果确定。

(3)建立隶属度函数。令 $\frac{a_k+a_{k+1}}{2}$ 属于第 k 个类的隶属度函数值为 1，$\left(\frac{a_k+a_{k+1}}{2},1\right)$ 与第 $k-1$ 个类的起点 a_{k-1} 和第 $k+1$ 个类的终点 a_{k+2} 连接，得到 j 指标关于 k 类的隶属度函数 $f_j^k(x)$，$j=1,2,\cdots,m;k=1,2,\cdots,s$。对于 $f_j^1(x)$ 和 $f_j^s(x)$，可分别根据具体情况将 j 指标取数区间向左、向右延拓至 a_0,a_{s+2}。

(4)根据装备的指标数值，分别计算属于各类的隶属度。

对于 j 指标的一个实际值 x，由公式

$$f_j^k(x)=\begin{cases}0\ ,\ x\notin[a_{k-1},a_{k+2}]\\(x-a_{k-1})/(\lambda_k-a_{k-1})\ ,x\in[a_{k-1},\lambda_k]\\(a_{k+2}-x)/(a_{k+2}-\lambda_k)\ ,x\in[\lambda_k,a_{k+2}]\end{cases}$$

计算出属于类 $k(1,2,\cdots,n)$ 的隶属度 $f_j^k(x)$，其中 $\lambda_k=\frac{a_k+a_{k+1}}{2}$。

(5)计算综合聚类系数，分析结果，做出合理判断。

①计算对象 $i(i=1,2,\cdots,n)$ 关于类 $k(k=1,2,\cdots,s)$ 的综合聚类系数 δ_i^k：

$$\delta_i^k=\sum_{j=1}^{m}f_j^k(x_{ij})w_j$$

式中，$f_j^k(x_{ij})$ 为对象 i 在指标 j 下属于类 k 的隶属度函数；w_j 为指标 j 在综合聚类中的权重。

②由 $\max\{\delta_i^k,k=1,\cdots,s\}=\delta_i^{k^*}$，判断对象 i 属于类 k^*。当有多个对象属于 k^* 时，可以进一步根据综合聚类的大小确定 k 类各对象的优劣，由此做出综合效能的合理判断。

二、应用实例

已知两种装备的性能指标数据如表 2-3 所示，比较它们的综合效能。

表 2-3　某两种装备的指标数据

指标		单位	编号	权重	差类 $[a_1,a_2]$	中类 $[a_2,a_3]$	好类 $[a_3,a_4]$	延拓值		指标数值	
								a_0	a_5	装甲	装乙
打击力	火炮口径	mm	N_1	9	[70,90)	[90,110)	[110,130]	60	140	105	120
	弹药基数	发	N_2	5	[25,35)	[35,50)	[50,60]	20	70	55	40
	单发命中率	%	N_3	3	[55,65)	[65,75)	[75,85)	50	90	65	80
	有效射程	km	N_4	5	[1,2)	[2,3)	[3,3.6]	0.8	4	1.7	3.5
机动力	最大行程	km	N_5	4	[300,400)	[400,500)	[500,550)	250	600	500	540
	最大爬坡度	(°)	N_6	1	[26,32)	[32,36)	[36,40)	20	42	31	33
	最大越野速度	km/h	N_7	4	[40,45)	[45,50)	[50,55])	35	60	48	52
	过垂直墙高	m	N_8	1	[0.8,1)	[1,1.2)	[1.2,1.4)	0.6	1.6	1.3	1
	越壕宽度	m	N_9	1	[2,2.4)	[2.4,2.8)	[2.8,3.2)	1.6	3.4	2.7	2.2
	公路速度	km/h	N_{10}	2	[65,70)	[70,75)	[75,80]	60	85	72	76
	加速时间	s	N_{11}	1	[7.5,8)	[7,7.5)	[6.5,7)	8.5	6	7	6.5
	涉水深	m	N_{12}	1	[1,1.5)	[1.5,2)	[2,2.5)	0.8	2.8	1.9	2.1
防护力	灭火扑灭时间	s	N_{13}	1	(140,160]	(120,140]	[100,120]	170	80	150	120
	正面装甲厚度	mm	N_{14}	4	[50,100]	(100,200)	[200,250]	45	280	220	180
	侧面装甲厚度	mm	N_{15}	3	(30,50)	[50,80]	(80,100)	20	120	90	60
信息力	通信距离	km	N_{16}	1	[10,20]	[20,30]	[30,40]	5	50	15	35
	探测距离	km	N_{17}	5	[2.5,2.7)	[2.7,3]	[3,3.2]	2.2	3.6	2.6	3.1
	识别目标距离	km	N_{18}	4	[1,1.4]	(1.4,1.8]	(1.8,2.2]	0.8	2.4	1.6	2
保障力	平均预防性维修时间	m	N_{19}	1	[18,30]	(8,18]	(4,8]	40	2	10	6
	平均修复性维修时间	m	N_{20}	1	[25,40]	(15,25]	(10,15]	45	8	20	12
	平均战场抢修维修时间	m	N_{21}	4	[15,20]	(10,15]	(5,10]	25	3	12	7

注：加速时间是指装备速度从 0～32km/h 所需的时间。

根据表 2-3 的指标分类，分别建立了装备各类指标实际数值 x 相对于“差”（设为第 1 类），“中”（设为第 2 类），“好”（设为第 3 类）三类的隶属度函数，

$$f_j^1(x)=\begin{cases}0, x\notin[a_0,a_3]\\(x-a_0)/(\lambda_1-a_0), x\in[a_0,\lambda_1]\\(a_3-x)/(a_3-\lambda_1), x\in[\lambda_1,a_3]\end{cases}\quad(k=1)$$

$$f_j^2(x)=\begin{cases}0, x\notin[a_1,a_4]\\(x-a_1)/(\lambda_2-a_1), x\in[a_1,\lambda_2]\\(a_4-x)/(a_4-\lambda_2), x\in[\lambda_2,a_4]\end{cases}\quad(k=2)$$

$$f_j^3(x)=\begin{cases}0, x\notin[a_2,a_5]\\(x-a_2)/(\lambda_3-a_2), x\in[a_2,\lambda_3]\\(a_5-x)/(a_5-\lambda_3), x\in[\lambda_3,a_5]\end{cases}\quad(k=3)$$

把两种装备指标实际数值代入上述三个隶属度公式，计算得到分类指标的隶属度函数值，如表 2-4 所示。

表 2-4　某两种装备指标的隶属度函数值

类别	N_1		N_2		N_3		N_4		N_5		N_6	
	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙
$f_j^1(x)$	0.6	0	0	0.5	0	0	0.87	0	0	0	0.71	0.43
$f_j^2(x)$	0.83	0.33	0.29	0.86	0.67	0.33	0.47	0	0.5	0.1	0.63	0.88
$f_j^3(x)$	0.83	1	1	0.25	0	1	0	0.63	0.71	0.8	0	0.17
类别	N_7		N_8		N_9		N_{10}		N_{11}		N_{12}	
	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙
$f_j^1(x)$	0.27	0	0	0.67	0.17	1	0.4	0	0	0	0.06	0
$f_j^2(x)$	0.93	0.4	0.33	0.67	0.83	0.33	0.93	0.53	0.67	0	0.8	0.53
$f_j^3(x)$	0.4	0.93	1	0	0.5	0	0.27	0.8	0.67	0.67	0.53	0.8
类别	N_{13}		N_{14}		N_{15}		N_{16}		N_{17}		N_{18}	
	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙
$f_j^1(x)$	1	0	0	0.16	0	0.5	1	0	1	0	0.33	0
$f_j^2(x)$	0.33	0.67	0.7	0.7	0.29	0.86	0.33	0.33	0.29	0.29	1	0.33
$f_j^3(x)$	0	0.67	0.96	0.64	1	0.25	0	1	0	1	0.33	1
类别	N_{19}		N_{20}		N_{21}							
	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙						
$f_j^1(x)$	0	0	0.3	0	0.27	0						
$f_j^2(x)$	0.67	0.33	1	0.2	0.93	0.27						
$f_j^3(x)$	0.67	1	0.4	0.89	0.4	0.89						

由表 2-4，根据综合聚类系数计算公式，得到两种武器装备的各项能力和综合作战效能的聚类系数，如表 2-5 所示。

表 2-5　两种装备的聚类系数

聚类系数	打击力		机动力		防护力		信息力		保障力		综合效能	
	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙	装甲	装乙
δ^1	9.8	2.5	2.01	2	1	2.14	7.52	0	1.38	0	21.71	6.64
δ^2	13.2	8.26	9.94	5.47	4	6.05	5.78	3.1	2.03	1.63	34.95	24.51
δ^3	12.47	16.4	7.68	10.16	5.94	3.98	1.32	10	2.67	5.45	30.08	40.99

由 $\max\{\delta_i^k, k=1,\cdots,s\}=\delta_i^{k^*}$，判断对象 i 属于类 k^* 的原则，从表 2-5 可以看出，装备甲的打击力中，机动力中，防护力好，信息力差，保障力好；综合效能中，装备乙的打击力好，机动力好，防护力差，信息力好，保障力好，综合效能好。

通过这种方法可以得到武器装备的综合性能的评价，得到一个综合的定性结论。



第三章 层次分析法

层次分析法(analytical hierarchy process,AHP)是美国匹兹堡大学教授A. L. Saaty于20世纪70年代提出的一种系统分析方法。由于研究工作的需要,Saaty教授开发了一种综合定性与定量分析,模拟人的决策思维过程,以解决多因素复杂系统,特别是难以定量描述的社会系统的分析方法。在1977年举行的第一届国际数学建模会议上,Saaty教授发表了《无结构决策问题的建模——层次分析理论》。从此,AHP开始引起人们的注意,并陆续被应用。1980年,Saaty教授出版了有关AHP的专著,之后,又陆续发表了一些有关AHP应用的论著。近年来,世界上有许多著名学者在AHP的理论研究和实际应用上做了大量的工作。

1982年11月,在我国召开的能源、资源、环境学术会议上,美国Moorhead大学能源研究所所长Nezhed教授首次向我国学者介绍了AHP方法。其后,天津大学许树柏等发表了我国第一篇介绍AHP的论文。随后,AHP的理论研究和实际应用在我国迅速开展。1988年9月,在天津召开了国际AHP学术讨论会,Saaty教授等国外学者和国内许多学者一起讨论了AHP的理论和应用问题。目前,AHP应用在能源政策分析、产业结构研究、科技成果评价、武器战略规划、人才考核评价以及发展目标分析等方面取得了令人满意的成果。

AHP是一种能将定性分析与定量分析相结合的系统分析方法。在进行系统分析时,我们经常会碰到这样一类情况:有些问题难以甚至基本不可能建立数学模

型进行定量分析;也可能由于时间紧迫,对有些问题还来不及进行过细的定量分析,只需做出初步的选择和大致的判断就行了。例如,选择一个新厂的厂址,购买一台重要设备,确定到哪里去旅游度假,等等。这时,若应用 AHP 进行分析,就可以简便而迅速地解决问题。

AHP 是分析多目标、多准则的复杂大系统的有力工具。它具有思路清晰、方法简便、适用面广、系统性强等特点,便于普及推广,可成为人们工作和生活中思考问题、解决问题的一种方法。将 AHP 引入决策,是决策科学化的一大进步。它最适宜于解决那些难以完全用定量方法进行分析的决策问题,因此,它是复杂的系统实现科学决策的有力工具。

层次分析法是一种解决多目标的复杂问题的定性与定量相结合的决策分析方法。层次分析法用决策者的经验判断各衡量目标能否实现的标准之间的相对重要程度,并合理地给出每个决策方案的每个标准的权数,利用权数求出各方案的优劣次序。

应用 AHP 解决问题的思路是:

第一步,把要解决的问题分层系列化,即根据问题的性质和要达到的目标,将问题分解为不同的组成因素,按照因素之间隔相互影响和隶属关系将其分层聚类组合,形成一个梯阶的、有序的层次结构模型。

第二步,对模型中每一层次因素的相对重要性,依据人们对客观现实的判断给予定量表示,再利用数学方法确定每一层次全部因素相对重要性次序的权值。

第三步,通过综合计算各层因素相对重要性的权值,得到最低层(方案层)相对于最高层(总目标)的相对重要性次序的组合权值,以此作为评价和选择方案的依据。

AHP 将人们的思维过程和主观判断数学化,不仅简化了系统分析与计算工作,而且有助于决策者保持其思维过程和决策原则的一致性,所以,对于那些难以全部量化处理的复杂的社会经济问题,它能得到比较满意的决策结果。

下面简单说明 AHP 的工作原理。

[例 1]假设某个应聘人员有三份工作可供选择,并且他必须确定接受哪份工作。对于第 i(在这个示例中,$i=1,2,3,4$)个目标而言,AHP 生成(根据将简单介绍的方法)的第 i 个目标的权为 $w_i(i=1,2,3,4)$。为了方便起见,所选择权之和应

该始终为 1。假设对于该示例某个应聘人员的权为

$$w_1 = 0.5115,\quad w_2 = 0.0986,\quad w_3 = 0.2433,\quad w_4 = 0.1466$$

(由于四舍五入的原因,这四个权之和不为 1)。这四个权表示高水平的起始工资是最重要的目标,其次是对工作的兴趣,然后是和家人的距离以及工作所在城市的生活质量。

接下来,假设某个应聘人员可以确定每份工作在各个目标上的“评分”情况。例如,假设某个应聘人员确定每份工作在各个目标上的评分如表 3-1 所示。例如,工作 1 可以最好地满足高水平起始工资的目标,但是在所有其他目标上的“评分”最差。

表 3-1 某个应聘人员对于各份工作和各个目标的“评分”

目标	工作 1	工作 2	工作 3
工资	0.571	0.286	0.143
生活质量	0.159	0.252	0.589
工作兴趣	0.088	0.669	0.243
与家人的接近程度	0.069	0.426	0.506

给定某个应聘人员的权和各份工作在各个目标上的评分,这时,他如何确定接受哪份工作呢?对于第 $j(j=1,2,3)$份工作而言,使用如下公式计算第 j 份工作的总分:

$$\sum_{i=1}^{i=4} w_i \quad (\text{第 } j \text{ 份工作在目标 } i \text{ 上的评分})$$

现在,选择总分最高的工作。注意,目标越重要,总分提供给工作评分的加权越大。通过计算各份工作的总分,我们可以知道:

工作 1 的总分 $= 0.511\,5(0.571) + 0.098\,6(0.159) + 0.243\,3(0.088) + 0.146\,6(0.069) = 0.339$

工作 2 的总分 $= 0.511\,5(0.286) + 0.098\,6(0.252) + 0.243\,3(0.669) + 0.146\,6(0.426) = 0.396$

工作 3 的总分 $= 0.511\,5(0.143) + 0.098\,6(0.589) + 0.243\,3(0.243) + 0.146\,6(0.506) = 0.265$

因此,AHP 指出该应聘人员应该接受工作 2。

下面详细介绍层次分析法。

第一节　层次分析法的基本原理

假设矩阵

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} W_1/W_1 & W_1W_2 & \cdots & W_1W_n \\ W_2W_1 & W_2W_2 & \cdots & W_2/W_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W_n/W_1 & W_nW_2 & \cdots & W_nW_n \end{bmatrix}=(a_{ij})_{n\times n}$$

显然

$$a_{ii}=1, a_{ij}=\frac{1}{a_{ij}}$$

$$a_{ij}=\frac{a_{ik}}{a_{jk}}(i,j,k=1,2\cdots,n)$$

且

$$\boldsymbol{AW}\begin{bmatrix} W_1/W_1 & W_1/W_2 & \cdots & W_1/W_n \\ W_2/W_1 & W_2/W_2 & \cdots & W_2/W_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W_n/W_1 & W_nW_2 & \cdots & W_nW_n \end{bmatrix}\begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} nW_1 \\ nW_2 \\ \vdots \\ nW_n \end{bmatrix}=n\boldsymbol{W}$$

在判断矩阵具有完全一致性的条件下，可以通过解特征值问题

$$\boldsymbol{AW}=\lambda_{\max}\boldsymbol{W}$$

求出正规化特征向量。同样，对于复杂的社会、经济、科技等问题，通过建立层次分析结构模型，构造出判断矩阵，利用特征值方法即可确定各种方案和措施的重要性排序权值，以供决策者参考。

使用 AHP，判断矩阵的一致性是十分重要的。所谓判断矩阵的一致性，即判断矩阵是否满足如下关系：

$$a_{ij} = \frac{a_{ir}}{a_{jr}} \quad (i,j,r = 1,2,\cdots,n)$$

上式完全成立时，称判断矩阵具有完全一致性。此时矩阵的最大特征根是 $\lambda_{max} = n$，其余特征根均为零。在一般情况下，可以证明判断矩阵的最大特征根为单根，且

$$\lambda_{max} \geqslant n$$

当判断矩阵具有满意的一致性时，λ_{max} 稍大于矩阵阶数 n，其余特征根接近于零。这时，基于 AHP 得出的结论才基本合理。但由于客观事物的复杂性和人们认识上的多样性，要求所有判断都有完全的一致性是不可能的，但要求一定程度上的判断一致，因此对构造的判断矩阵需要进行一致性检验。

第二节　层次分析法的步骤

用 AHP 分析问题大体要经过以下五个步骤：①建立层次结构模型；②构造判断矩阵；③层次单排序；④层次总排序；⑤一致性检验。其中后三个步骤在整个过程中需要逐层地进行。

一、建立层次结构模型

运用 AHP 进行系统分析，首先要将所包含的因素分组，每一组作为一个层次，按照最高层、若干有关的中间层和最低层的形式排列起来，例如，对于决策问题，通常可以将其划分成如图 3-1 所示的层次结构模型。其中：

最高层：表示解决问题的目的，即应用 AHP 所要达到的目标。

中间层：它表示采用某种措施和政策来实现预定目标所涉及的中间环节，一般又分为策略层、约束层、准则层等。

最低层：表示解决问题的措施或政策（即方案）。

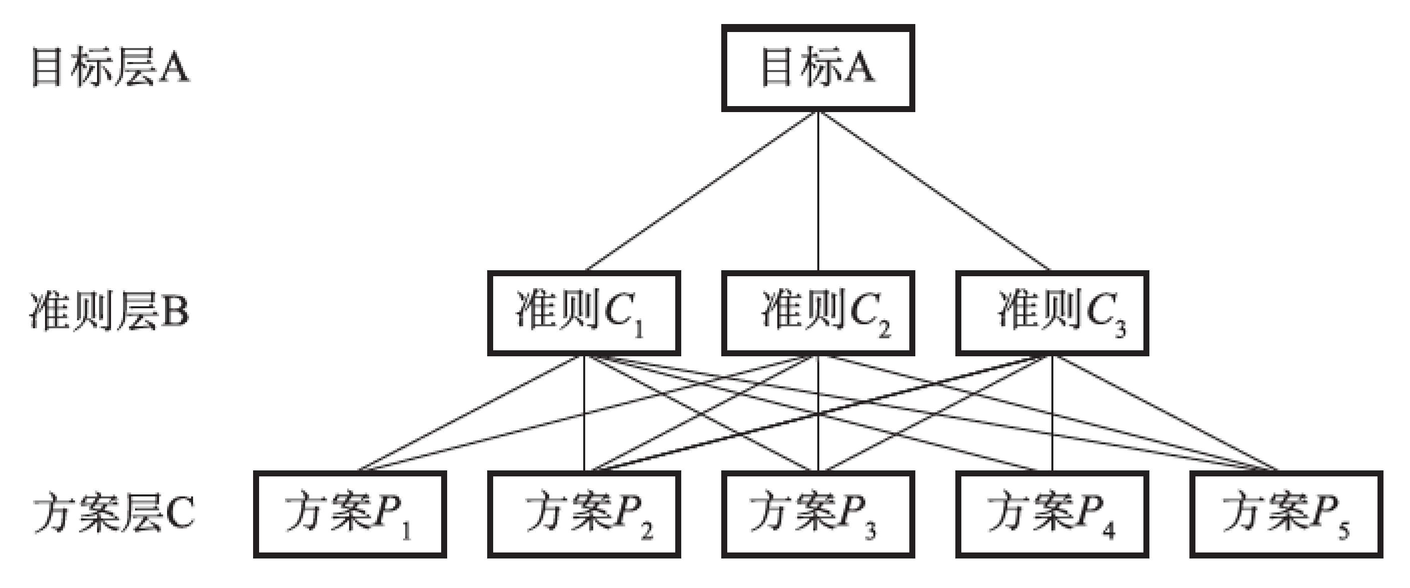


图 3-1　递阶的层次结构模型

标明上一层因素与下一层因素之间的联系。如果某个因素与下一层次所有因素均有联系,那么称这个因素与下一层次存在完全层次关系。有时存在不完全层次关系,即某个因素只与下一层次的部分因素有联系。层次之间可以建立子层次。子层次从属于主层次的某个因素,它的因素与下一层次的因素有联系,但不形成独立层次,层次结构模型往往用结构模型图表示。

二、构造判断矩阵

任何系统分析都以一定的信息为基础。AHP 的信息基础主要是人们对每一层次各因素的相对重要性给了判断,这些判断用数值表示出来,写成矩阵形式就是判断矩阵。判断矩阵是 AHP 工作的出发点。构造判断矩阵是 AHP 的关键一步。

判断矩阵表示针对上一层次某因素而言,本层次与之有关的各因素之间的相对重要性。假定 A 层中因素 A_k 与下一层次中因素 $B_1, B_2, \cdots, B_n$ 有联系,则我们构造的判断矩阵如表 3-2 所示。

表 3-2　判 断 矩 阵

A_k	B_1	B_2	…	B_n
B_1	b_{11}	b_{12}	…	b_{1n}
B_2	b_{21}	b_{22}	…	b_{2n}
…	…	…		…
B_n	b_{n1}	b_{n2}	…	b_{nn}

其中,b_{ij} 是对于 A_k 而言,B_i 对 B_j 的相对重要性的数值表示,通常 b_{ij} 取1,2,3,…,9及

它们的倒数。

关于如何确定 a_{ij} 的值，Saaty 等建议引用数字 1～9 及其倒数作为标度。表 3-3 列出了 1～9 标度的含义。

表 3-3　1～9 标度的含义

标度	含　　义
1	表示两个因素相比，具有相同重要性；
3	表示两个因素相比，前者比后者稍重要；
5	表示两个因素相比，前者比后者明显重要；
7	表示两个因素相比，前者比后者强烈重要；
9	表示两个因素相比，前者比后者极端重要；
2、4、6、8	表示上述相邻判断的中间值；
倒数	若因素 i 与因素 j 的重要性之比为 a_{ij}，那么因素 j 与因素 i 重要性之比为 $a_{ji}=\dfrac{1}{a_{ij}}$

即

$b_{ij}=1$，表示 B_i 与 B_j 一样重要；

$b_{ij}=3$，表示 B_i 比 B_j 重要一点（稍微重要）；

$b_{ij}=5$，表示 B_i 比 B_j 重要（明显重要）；

$b_{ij}=7$，表示 B_i 比 B_j 重要得多（强烈重要）；

$b_{ij}=9$，表示 B_i 比 B_j 极端重要（绝对重要）。

它们之间的数 2、4、6、8 及各数的倒数具有相应的类似意义。采用 1～9 的比例标度的依据是：其一，心理学实验表明，大多数人对不同事物在相同属性上差别的分辨能力在 5～9 级，采用 1～9 的标度反映了大多数人的判断能力；其二，大量的社会调查表明，1～9 的比例标度早已为人们所熟悉和采用；其三，科学考察和实践表明，1～9 的比例标度已完全能区分引起人们感觉差别的事物的各种属性。

显然，任何判断矩阵都应满足

$$b_{ij}=1$$

$$b_{ij}=\frac{1}{b_{ji}}\quad(i,j=1,2,\cdots,n)$$

因此，对于 n 阶判断矩阵，仅需要对 $n(n-1)/2$ 个矩阵元素给出数值。

三、层次单排序

所谓层次单排序，是指根据判断矩阵计算对于上一层某因素而言，本层次与之有联系的因素的重要性次序的权值。它是本层次所有因素相对上一层次而言的重要性进行排序的基础。

层次单排序可以归结为计算判断矩阵的特征根和特征向量问题，即对判断矩阵 $\boldsymbol{B}$，计算满足

$$\boldsymbol{BW} = \lambda_{\max}\boldsymbol{W}$$

的特征根与特征向量，式中 $\lambda_{\max}$ 为 $\boldsymbol{B}$ 的最大特征根，$\boldsymbol{W}$ 为对应于 $\lambda_{\max}$ 的正规化特征向量，$\boldsymbol{W}$ 的分量 W_i 即是相应因素单排序的权值。

为了检验矩阵的一致性，需要计算它的一致性指标 CI，定义

$$\mathrm{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

显然，当判断矩阵具有完全一致性时，CI＝ 0。$\lambda_{\max}-n$ 越大，CI 越大，矩阵的一致性越差。为了检验判断矩阵是否具有满意的一致性，需要将 CI 与平均随机一致性指标 RI 进行比较。对于 1～9 阶矩阵，RI 分别如表 3-4 所示。

表 3-4　1～9 阶矩阵的平均随机一致性指标

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

对于 1 阶、2 阶判断矩阵，RI 只是形式上的，按照我们对判断矩阵所下的定义，1 阶、2 阶判断矩阵总是完全一致的，当阶数大于 2 时，判断矩阵的一致性指标 CI，与同阶平均随机一致性的指标 RI 之比称为判断矩阵的随机一致性比例，记为 CR，当 CR＝CI/RI＜0.10 时，判断矩阵具有满意的一致性，否则就需要对判断矩阵进行调整。

四、层次总排序

利用同一层次中所有层次单排序的结果，就可以计算针对上一层次而言本层

次所有因素重要性的权值，这就是层次总排序。层次总排序需要从上到下逐层顺序进行，对于最高层下面的第二层，其层次单排序即为总排序。假定上一层次所有因素 $A_1, A_2, \cdots, A_n$ 的总排序已完成，得到的权值分别为 $a_1, a_2, \cdots, a_n$，与 a_i 对应的本层次因素 $B_1, B_2, \cdots, B_n$ 单排序的结果为

$$b_1^i, b_2^i, \cdots, b_n^i$$

这里，若 B_j 与 A_i 无关，则 $b_j^i = 0$，层次总排序如表 3-5 所示。

表 3-5　层次总排序

层次 A	A_1	A_2	$\cdots$	A_n	层次 B 的总排序
	a_1	a_2	$\cdots$	a_n	
B_1	b_1^1	b_1^2	$\cdots$	b_n^m	$\sum_{i=1}^{m} a_i b_1^i$
B_2	b_2^1	b_2^2	$\cdots$	b_2^m	$\sum_{i=1}^{m} a_i b_2^i$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
B_n	b_n^1	b_n^2	$\cdots$	b_n^m	$\sum_{i==1}^{m} a_i b_n^i$

显然

$$\sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} a_i b_j^i = 1$$

即层次总排序仍然是归一化正规向量。

五、一致性检验

为评价层次总排序的计算结果的一致性如何，需要计算与单排序类似的检验量。

CI 为层次总排序一致性指标；

RI 为层次总排序平均随机一致性指标；

CR 为层次总排序随机一致性比例。

它们的表达式分别为

$$\mathrm{CI} = \sum_{i=1}^{m} a_i \mathrm{CI}_i$$

式中，CI_i 为与 a_i 对应的层次 B 中判断矩阵的一致性指标。

$$RI = \sum_{i=1}^{m} a_i RI_i$$

式中，RI_i 为与 a_i 对应的层次 B 中判断矩阵的平均随机一致性指标。

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

同样当

$$CR \leqslant 0.1$$

时，认为层次总排序的计算结果具有满意的一致性。

第三节　层次分析法的计算方法

AHP 计算的根本问题是如何计算判断矩阵的最大特征根 λ_{max} 及其对应的特征向量 $\boldsymbol{W}$。下面简要介绍三种常用的计算方法。

一、幂法

计算特征根的幂法使我们有可能利用计算机得到任意精确度的最大特征 λ_{max} 及其对应的特征向量 $\boldsymbol{W}$。这一方法的计算步骤如下。

(1)任取与判断矩阵 $\boldsymbol{B}$ 同阶的正规化的初值向量 $\boldsymbol{W}^0$。

(2)计算

$$\overline{\boldsymbol{W}}^{k+1} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{W}^k, \quad k = 0,1,2,\cdots$$

(3)令 $\beta = \sum_{i=1}^{n} \overline{\boldsymbol{W}}_i^{k+1}$，计算

$$\boldsymbol{W}^{k+1} = \frac{1}{\beta}\overline{\boldsymbol{W}}^{k+1}, \quad k = 0,1,2\cdots$$

(4)对于预先给定的精确度 ε，当

$$|\overline{\boldsymbol{W}}_i^{k+1}-\boldsymbol{W}_i^k|<\varepsilon$$

对所有 $i=1,2,\cdots,n$ 成立时，则 $\boldsymbol{W}=\boldsymbol{W}_i^{k+1}$ 为所求特征向量。$\lambda_{\max}$可由下式求得

$$\lambda_{max}=\sum_{i=1}^{n}\frac{\boldsymbol{W}_i^{k+1}}{n\boldsymbol{W}_i^k}$$

式中，n 为矩阵阶数；$\boldsymbol{W}_i^k$ 为向量 $\boldsymbol{W}^k$ 的第 i 个分量。

二、和积法

为简化计算，可采用近似方法——和积法计算，它使得我们可以仅使用小型计算器在保证足够精确度的条件下运用 AHP。具体计算步骤如下。

（1）将判断矩阵每一列正规化

$$\bar{b}_{ij}=\frac{b_{ij}}{\sum\limits_{k=1}^{n}b_{kj}},\quad i,j=1,2,\cdots,n$$

（2）每一列经正规化后的判断矩阵按行相加

$$\overline{W}_i=\sum_{j=1}^{n}\bar{b}_{ij},\quad j=1,2,\cdots,n$$

（3）对向量 $\overline{\boldsymbol{W}}=[\overline{W}_1,\overline{W}_2,\overline{W}_n]^{\mathrm{T}}$ 正规化

$$W=\frac{\overline{W}_i}{\sum\limits_{j=1}^{n}\overline{W}_j},\quad i=1,2,\cdots,n$$

所得到的 $\boldsymbol{W}=[W_1,W_2,\cdots,W_n]^T$ 即为所求特征向量。

（4）计算判断矩阵最大特征根 λ_{max}

$$\lambda_{\max}=\sum_{i=1}^{n}\frac{(\boldsymbol{AW})_i}{n\boldsymbol{W}_i}$$

式中，$(\boldsymbol{AW})_i$表示向量 $\boldsymbol{AW}$ 的第 i 个分量。

三、方根法

为简化计算，AHP 也可采用另一种近似方法——方根法计算，其步骤如下。

(1) 判断矩阵 **B** 的元素按行相乘

$$M_i = \prod_{j=1}^{n} b_{ij} \quad (i,j = 1,2,\cdots,n)$$

(2) 所得的乘积分别开 n 次方

$$\overline{W}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (i,j = 1,2,\cdots,n)$$

(3) 将方根向量正规化,即得特征向量 **W**

$$W_i = \frac{\overline{W}_i}{\sum_{i=1}^{n} W_i} \quad (i = 1,2,\cdots,n)$$

(4) 计算判断矩阵最大的特征根 λ_{max}

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^{n} \frac{(\boldsymbol{AW})_i}{n\boldsymbol{W}_i}$$

式中,$(\boldsymbol{AW})_i$ 为向量 **AW** 的第 i 个分量。

［**例 2**］ 分别用和积法和方根法计算表 3-6 中判断矩阵的最大特征根及其对应的特征向量,并判断一致性。

表 3-6 *A-C* 判断矩阵

B	C_1	C_2	C_3
C_1	1	1/5	1/3
C_2	5	1	3
C_3	3	1/3	1

［**解**］ 按上述和积法的计算步骤:

(1) $$\overline{b}_{11} = \frac{b_{11}}{b_{11}+b_{21}+b_{31}} = \frac{1}{1+5+3} = 0.111$$

$$\overline{b}_{11} = \frac{b_{11}}{b_{11}+b_{21}+b_{31}} = \frac{5}{1+5+3} = 0.556$$

$$\overline{b}_{11} = \frac{b_{11}}{b_{11}+b_{21}+b_{31}} = \frac{3}{1+5+3} = 0.333$$

同理可求

$$\overline{b}_{12} = 0.130, \overline{b}_{22} = 0.652, \overline{b}_{23} = 0.217$$

$$\overline{b}_{13} = 0.077, \overline{b}_{32} = 0.692, \overline{b}_{32} = 0.231$$

得到按列正规化后的判断矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0.111 & 0.130 & 0.077 \\ 0.556 & 0.652 & 0.692 \\ 0.333 & 0.217 & 0.231 \end{bmatrix}$$

（2）按上述步骤(2)，按行相加得

$$\overline{\boldsymbol{W}}_1 = \sum_{j=1}^{n} \overline{b}_{ij} = 0.111 + 0.130 + 0.077 = 0.318$$

$$\overline{\boldsymbol{W}}_2 = 0.556 + 0.652 + 0.692 = 1.900$$

$$\overline{\boldsymbol{W}}_3 = 0.333 + 0.217 + 0.231 = 0.781$$

（3）将向量 $\overline{\boldsymbol{W}} = [0.318, 1.900, 0.781]^{\mathrm{T}}$ 正规化得

$$\sum_{j=1}^{n} \overline{\boldsymbol{W}}_j = 0.318 + 1.900 + 0.781 = 2.999$$

$$\boldsymbol{W}_1 = \frac{\overline{\boldsymbol{W}}_1}{\sum_{j=1}^{n} \overline{\boldsymbol{W}}_j} = \frac{0.318}{2.999} = 0.106$$

$$\boldsymbol{W}_2 = \frac{\overline{\boldsymbol{W}}_2}{\sum_{j=1}^{n} \overline{\boldsymbol{W}}_j} = \frac{1.900}{2.999} = 0.634$$

$$\boldsymbol{W}_3 = \frac{\overline{\boldsymbol{W}}_3}{\sum_{j=1}^{n} \overline{\boldsymbol{W}}_j} = \frac{0.781}{2.999} = 0.26$$

则所求特征向量为

$$\boldsymbol{W} = [0.106, 0.634, 0.26]^{\mathrm{T}}$$

（4）计算判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$

$$\boldsymbol{AW} = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 \\ 5 & 1 & 3 \\ 3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.106 \\ 0.634 \\ 0.26 \end{bmatrix}$$

$$(\boldsymbol{AW})_1 = 1 \times 0.106 + \frac{1}{5} \times 0.634 + \frac{1}{3} \times 0.26 = 0.320$$

$$(\boldsymbol{AW})_2 = 5 \times 0.106 + 1 \times 0.634 + 3 \times 0.26 = 1.941$$

$$(\boldsymbol{AW})_3 = 3 \times 0.106 + \frac{1}{3} \times 0.634 + 1 \times 0.26 = 0.785$$

$$\lambda_{max}=\sum_{i=1}^{n}\frac{(\boldsymbol{AW})_i}{nW_i}=\frac{(\boldsymbol{AW})_1}{3W_1}+\frac{(\boldsymbol{AW})_2}{3W_2}+\frac{(\boldsymbol{AW})_3}{3W_3}$$

$$=\frac{0.320}{3\times0.106}+\frac{1.941}{3\times0.634}+\frac{0.785}{3\times0.26}=3.036$$

$$CI=\frac{\lambda_{max}-1}{n-1}=\frac{3.036-1}{3-1}=0.018,$$

由表 3-4 可查得，判断矩阵为 3 阶，RI= 0.58；

则

$$CR=\frac{CI}{RI}=\frac{0.018}{0.58}=0.031\ 03<0.1$$

故判断矩阵具有满意的一致性。

按上述方根法的计算步骤如下。

（1）计算判断矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的每一行元素乘积

$$M_1=b_{11}b_{12}b_{13}=1\times\frac{1}{5}\times\frac{1}{3}=\frac{1}{15}$$

$$M_2=b_{21}b_{22}b_{23}=5\times1\times3=15$$

$$M_3=b_{31}b_{32}b_{33}=3\times\frac{1}{3}\times1=1$$

（2）计算 M_1，M_2，M_3的 3 次方根

$$\overline{W}_1=\sqrt[3]{M_1}=\sqrt[3]{\frac{1}{15}}=0.405$$

$$\overline{W}_2=\sqrt[3]{M_2}=\sqrt[3]{15}=2.47$$

$$\overline{W}_3=\sqrt[3]{M_3}=\sqrt[3]{1}=1$$

（3）将 $\overline{W}_1$，$\overline{W}_2$ $\overline{W}_3$ 归一化

$$W_1=\frac{\overline{W}_1}{\overline{W}_1+\overline{W}_2+\overline{W}_3}=\frac{0.405}{0.405+2.47+1}=0.105$$

$$W_2=\frac{\overline{W}_2}{\overline{W}_1+\overline{W}_2+\overline{W}_3}=\frac{2.47}{0.405+2.47+1}=0.637$$

$$W_3=\frac{\overline{W}_3}{\overline{W}_1+\overline{W}_2+\overline{W}_3}=\frac{1}{0.405+2.47+1}=0.258$$

所求的特征向量为

$$\boldsymbol{W}=[0.105,0.637,0.258]^{\mathrm{T}}$$

（4）计算判断矩阵的最大特征根 λ_{max}

$$\boldsymbol{AW}=\begin{bmatrix}1 & 1/5 & 1/3\\ 5 & 1 & 3\\ 3 & 1/3 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0.105\\ 0.637\\ 0.258\end{bmatrix}$$

则

$$(\boldsymbol{AW})_1=1\times0.105+\frac{1}{5}\times0.637+\frac{1}{3}\times0.258=0.318$$

$$(\boldsymbol{AW})_2=5\times0.105+1\times0.637+3\times0.258=1.936$$

$$(\boldsymbol{AW})_2=3\times0.105+\frac{1}{3}\times0.637+1\times0.258=0.785$$

$$\lambda_{\max}=\frac{(\boldsymbol{AW})_1}{3W_1}+\frac{(\boldsymbol{AW})_2}{3W_2}+\frac{(\boldsymbol{AW})_3}{3W_3}$$

$$=\frac{0.318}{3\times0.105}+\frac{1.936}{3\times0.637}+\frac{0.785}{3\times0.258}=3.036\,78$$

$$\mathrm{CI}=\frac{\lambda_{\max}-1}{n-1}=\frac{3.036\,78-1}{3-1}=0.018\,39$$

由表 3-4 可查得，RI = 0.58。

则

$$\mathrm{CR}=\frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}}=\frac{0.018\,39}{0.58}=0.031\,7<0.1$$

故判断矩阵具有满意的一致性。

第四节　层次分析法的应用

［**例 3**］　层次分析法用于方案排序

某厂企业留成利润要决定其用途，总目标是希望能促进工厂更进一步发展。可供选择的方案有：作为奖金发给职工；扩建集体福利设施；开办职工业余学校；建

设图书馆或俱乐部;引进新设备进行技术改造。衡量这些方案(措施)可从以下三方面考虑:是否调动了职工的生产积极性;是否提高了企业的技术水平;是否改善了职工生产状况。现在要对上述五种方案进行优劣性评价,或者说按优劣顺序把这五种方案排列起来,以便从中选择一种方案付诸实施。

［**解**］ 应用 AHP 对此问题进行分析后,可建立如图 3-2 所示的层次结构模型。

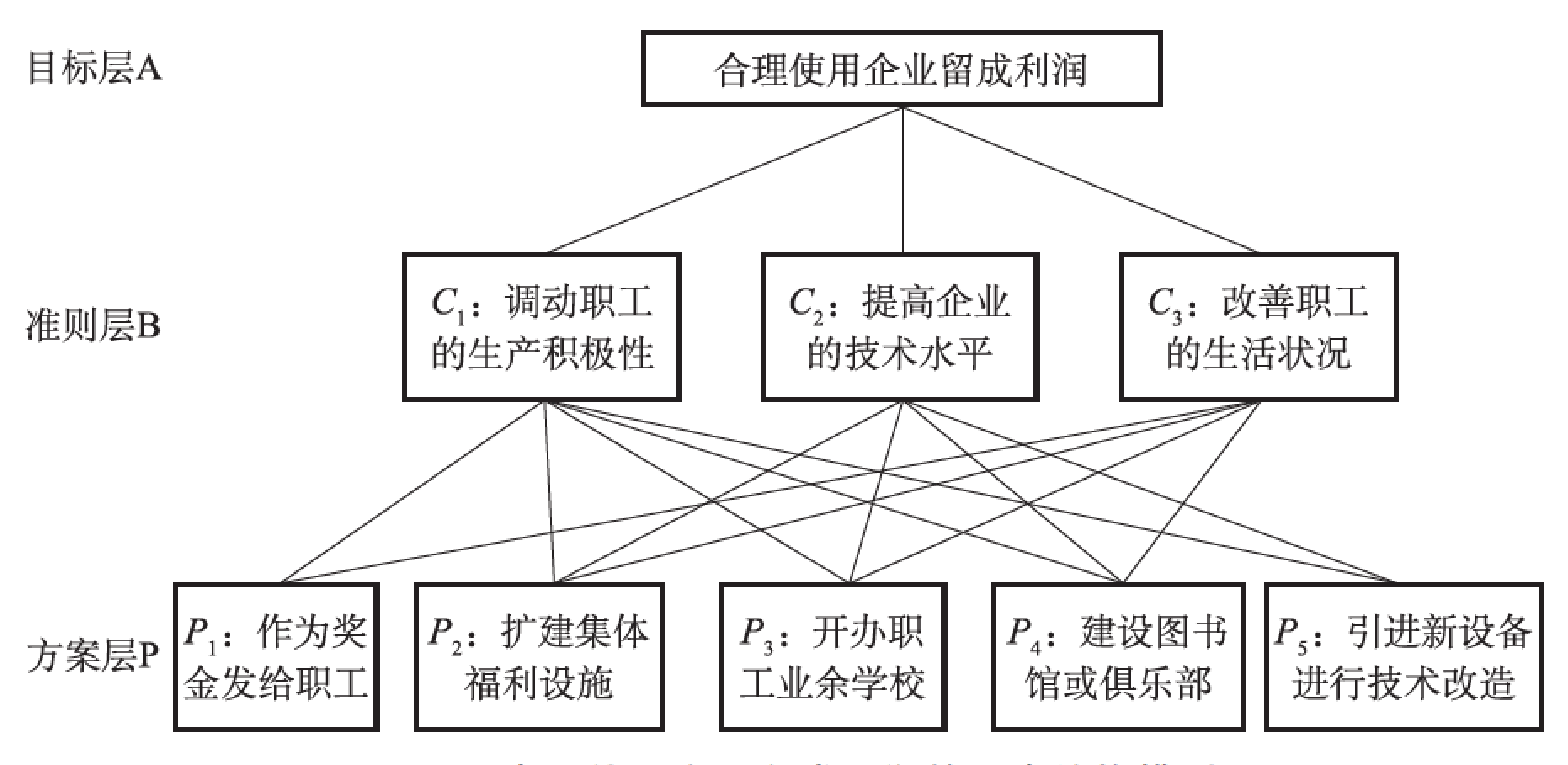


图 3-2 合理使用企业留成利润的层次结构模型

根据各因素的重要性比较构造判断矩阵并进行计算,所得判断矩阵及相应计算结果如下。

(1) 判断矩阵 A—C(相对于总目标而言,各着眼准则之间的相对重要性比较),如表 3-7 所示。

表 3-7 A—C 判断矩阵

A	C_1	C_2	C_3	W
C_1	1	1/5	1/3	0.104 2
C_2	5	1	3	0.637 2
C_3	3	1/3	1	0.258 3

$$\lambda_{max} = 3.038\ 5$$

$$\mathrm{CI} = 0.019\ 3$$

$$\mathrm{RI} = 0.58$$

$$\mathrm{CR} = 0.033\ 2 < 0.10$$

可见判断矩阵具有满意的一致性。

(2) 判断矩阵 C_1-P(相对于调动生产积极性准则而言,各方案之间的相对重要性比较),如表 3-8 所示。

表 3-8　C_1-P 判断矩阵

C_1	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	W
P_1	1	3	5	4	7	0.491
P_2	1/3	1	3	2	5	0.232
P_3	1/5	1/3	1	1/2	3	0.092
P_4	1/4	1/2	2	1	3	0.138
P_5	1/7	1/5	1/3	1/2	1	0.046

$$\lambda_{max}= 5.126$$

$$\mathrm{CI}=\frac{\lambda_{max}-1}{n-1}=\frac{5.126-5}{5-1}=0.032$$

$$\mathrm{RI}=1.12$$

$$\mathrm{CR}=\frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}}=\frac{0.032}{1.12}=0.028<1.10$$

(3) 判断矩阵 C_2-P(相对于提高技术水平准则而言,各方案之间的相对重要性比较),如表 3-9 所示。

表 3-9　C_2-P 判断矩阵

C_2	P_2	P_3	P_4	P_5	W
P_2	1	1/7	1/3	1/5	0.055
P_3	7	1	5	3	0.564
P_4	3	1/5	1	1/3	0.118
P_5	5	1/3	3	1	0.263

$$\lambda_{max}= 4.117$$

$$\mathrm{CI}=\frac{\lambda_{max}-1}{n-1}=\frac{4.117-4}{4-1}=0.039$$

$$\mathrm{RI}=0.90$$

$$\mathrm{CR}=\frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}}=\frac{0.039}{0.90}=0.043<0.10$$

(4) 判断矩阵 C_3-P(相对于改善职工生活状况准则而言,各方案之间的相对重要性比较),如表 3-10 所示。

表 3-10　C_3-P 判断矩阵

C_1	P_1	P_2	P_3	P_4	W
P_1	1	1	3	3	0.406
P_2	1	1	3	3	0.406
P_3	1/3	1/3	1	1	0.094
P_4	1/3	1/3	1	1	0.094

$$\lambda_{max} = 4$$

$$CI = 0$$

$$RI = 0$$

层次总排序计算结果如表 3-11 所示。

表 3-11　层次总排序计算结果

层次 C / 层次 P	C_1	C_2	C_3	层次 P 总排序权值	方案排序
	0.104	0.637	0.258		
P_1	0.491	0	0.406	0.157	4
P_2	0.232	0.055	0.406	0.164	3
P_3	0.092	0.564	0.094	0.393	1
P_4	0.138	0.118	0.094	0.113	5
P_5	0.046	0.263	0	0.172	2

其中,P_1 总排序权值计算为

$$0.104\times0.491+0.634\times0+0.258\times0.406 = 0.157$$

P_2 总排序权值计算为

$$0.104\times0.232+0.637\times0.055+0.258\times0.406 = 0.164$$

其余依此类推。

$$CI = 0.028$$

$$RI = 0.9231$$

$$\frac{CI}{RI}=\frac{0.028}{0.923\ 1}$$

$$CR = 0.030\ 5<0.1$$

计算结果表明，为合理使用企业利润留成，对于该企业来说，所提出的五种方案的优先次序为：P_3——开办职工业余学校，权值为 0.393；P_5——引进新设备进行技术改造，权值为 0.172；P_2——扩建集体福利设施，权值 0.164；P_1——作为奖金发给职工，权值为 0.157；P_4——建设图书馆或职工俱乐部，权值为 0.113。根据上述排序结果进行决策。需要注意的是，不同的人对不同企业中的不同情况，有不同的判断。用不同的判断值，计算的拓序结果也不一样。所以应当请那些对所处理的问题由专门研究的人来做判断，因为他们对所处理的问题和周围的环境了解得越透彻，便越能得到合理的判断和正确的排序结果。

［**例 4**］ 某地政府选择最佳支柱民生产品的层次结构模型如图 3-3 所示，讨论如何利用层次分析法进行选择。

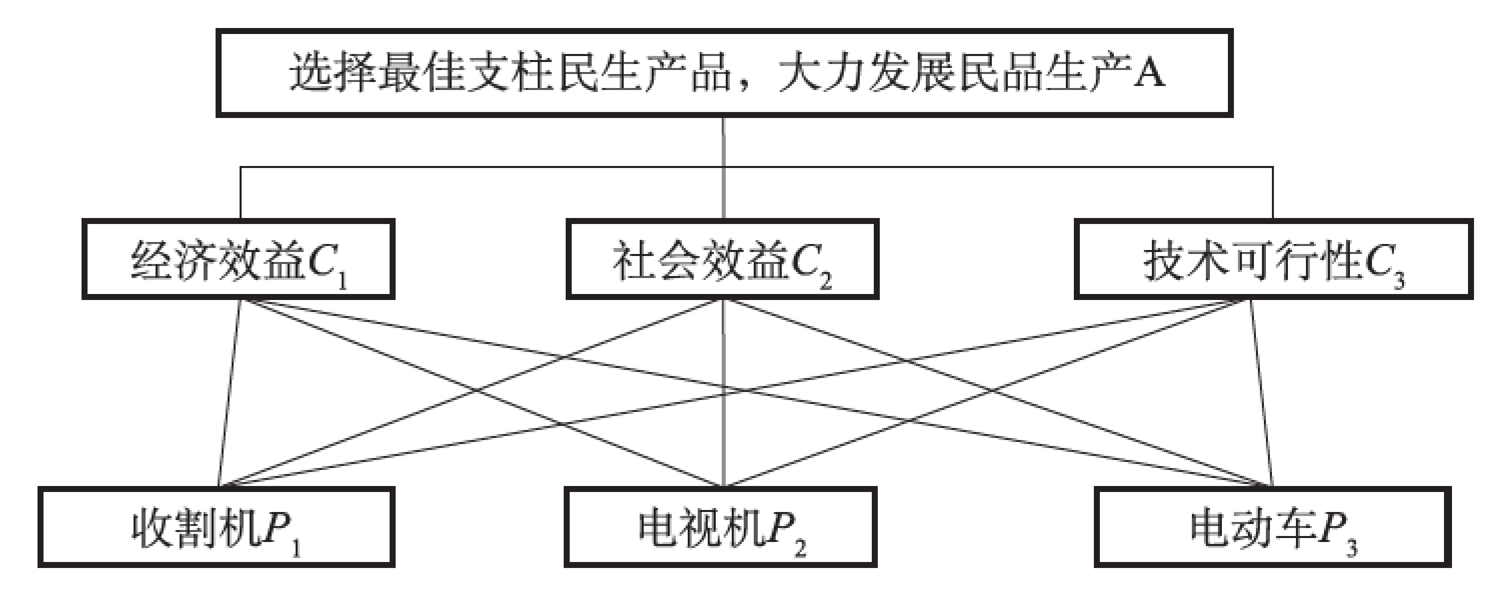


图 3-3 政府选择最佳支柱民生产品的层次结构模型

［**解**］ 利用层次分析法计算过程如下。

(1) $A-C$ 判断矩阵（对选择最佳支柱民生产品而言，各个评价准则的相对重要性比较），如表 3-12 所示。

表 3-12 $A-C$ 判断矩阵

A	C_1	C_2	C_3	W
C_1	1	1	3	0.428 6
C_2	1	1	3	0.428 6
C_3	1/3	1/3	1	0.142 8

$$\lambda_{max}=3$$

$$CI=0$$
$$CR=0$$

(2)C_1-P 判断矩阵(从经济效益出发选择支柱民生产品时,各产品的相对优越性比较)如表 3-13 所示。

表 3-13　C_1-P 判断矩阵

C_1	P_1	P_2	P_3	W
P_1	1	3	5	0.637 0
P_2	1/3	1	3	0.258 3
P_3	1/5	1/3	1	0.104 7

$$\lambda_{max}=3.038\,5$$
$$CI=0.019\,3$$
$$RI=0.58$$
$$CR=0.033\,2<0.1$$

(3)C_2-P 判断矩阵(从社会效益出发选择支柱民生产品时,各产品的相对优越性比较),如表 3-14 所示。

表 3-14　C_2-P 判断矩阵

C_1	P_1	P_2	P_3	W
P_1	1	2	3	0.549 9
P_2	1/2	1	1	0.240 2
P_3	1/3	1	1	0.209 8

$$\lambda_{max}=3.018\,4$$
$$CI=0.009\,2$$
$$RI=0.58$$
$$CR=0.015\,9<0.1$$

(4)C_3-P 判断矩阵(从技术可行性出发选择支柱民生产品时,各产品的相对优越性比较),如表 3-15 所示。

表 3-15　C_3—P 判断矩阵

C_1	P_1	P_2	P_3	W
P_1	1	5	7	0.720 7
P_2	1/5	1	3	0.195 7
P_3	1/7	1/3	1	0.083 5

$$\lambda_{max} = 3.090$$
$$CI = 0.004\,5$$
$$RI = 0.58$$
$$CR = 0.078 < 0.1$$

对于政府选择最佳民生产品的总目标来说，各产品的层次总排序结果如表 3-16 所示。

表 3-16　各产品的层次总排序结果

层次 C / 层次 P	经济效益 C_1	社会效益 C_2	技术可行性 C_3	层次 P 总排序权值	方案排序
	0.428 6	0.428 6	0.142 8		
收割机 P_1	0.637 0	0.549 9	0.720 7	0.611 6	1
电视机 P_2	0.258 3	0.240 2	0.195 7	0.241 6	2
电动车 P_3	0.104 7	0.209 8	0.083 5	0.146 7	3

层次总排序的一致性检验如下：

$$\begin{aligned} CI &= \sum_{i=1}^{3} C_i CI_i \\ &= 0.428\,6 \times 0.019\,3 + 0.428\,6 \times 0.009\,2 + 0.142\,8 \times 0.045 \\ &= 0.018\,6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} RI &= \sum_{i=1}^{3} C_i RI_i \\ &= 0.428\,6 \times 0.58 + 0.428\,6 \times 0.58 + 0.142\,8 \times 0.58 \\ &= 0.58 \end{aligned}$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.018\,6}{0.58} = 0.032 < 0.10$$

因此，上述判断矩阵 $A-C$，C_1-P，C_2-P、C_3-P 和层次总排序结果均具有满意的一致性。

按照上述计算结果，政府应该选择收割机作为最佳支柱民生产品，因为其总排序权值为 0.611 6，是最大的。这个计算结果与用定性分析方法得到的结果完全一致。

［**例 5**］ 某厂标准件产品质量影响因素的层次结构模型图，如图 3-4 所示讨论如何利用层次分析法决策。

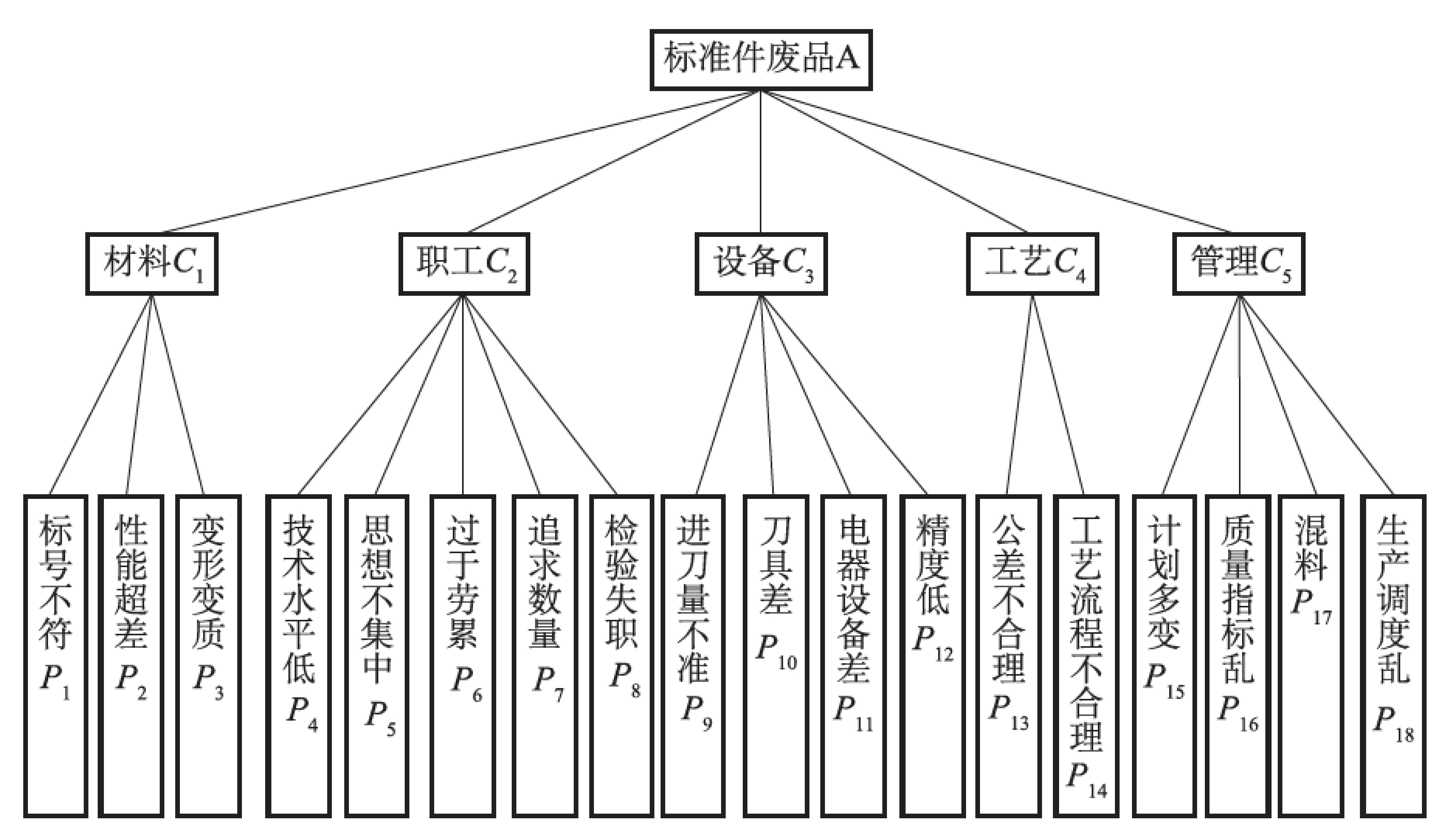


图 3-4　某厂标准件产品质量影响因素的层次结构模型

［**解**］ 利用层次分析法计算过程如下。

其判断矩阵及计算结果如表 3-17～表 3-22 所示。

表 3-17　$A-C$ 判断矩阵

A	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	W	一致性检验
C_1	1	1/7	1/5	5	3	0.120 2	
C_2	7	3	3	7	5	0.503 1	
C_3	5	1	1	5	3	0.262 5	CR ＝ 0.096＜0.1
C_4	1/5	1/5	1/5	1	1/3	0.038 8	
C_5	1/3	1/3	1/3	3	1	0.075 9	

表 3-18　C_1—P 判断矩阵

C_1	P_1	P_2	P_3	W	一致性检验
P_1	1	1/3	3	0.258 3	
P_2	3	1	5	0.637 0	CR = 0.033<0.1
P_3	1/3	1/5	1	0.104 7	

表 3-19　C_1—P 判断矩阵

C_2	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	W	一致性检验
P_4	1	3	9	5	7	0.508 2	
P_5	1/3	1	7	3	5	0.262 2	
P_6	1/9	1/7	1	1/3	1/5	0.034 0	CR = 0.083 8<0.1
P_7	1/5	1/3	3	1	3	0.119 0	
P_8	1/7	1/5	5	1/3	1	0.076 5	

表 3-20　C_3—P 判断矩阵

C_3	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	W	一致性检验
P_9	1	1/5	1/3	1/7	0.055 3	
P_{10}	5	1	3	1/3	0.262 2	CR = 0.043 1<0.1
P_{11}	3	1/3	1	1/5	0.117 5	
P_{12}	7	3	5	1	0.565 0	

表 3-21　C_4—P 判断矩阵

C_4	P_{13}	P_{14}	W	一致性检验
P_{13}	1	1/3	0.25	CR = 0
P_{14}	3	1	0.75	

表 3-22　C_5—P 判断矩阵

C_5	P_{15}	P_{16}	P_{17}	P_{18}	W	一致性检验
P_{15}	1	1/3	3	1/5	0.123 7	
P_{16}	3	1	3	1/3	0.240 6	CR = 0.015 7<0.1
P_{17}	1/3	1/3	1	1/7	0.064 7	
P_{18}	5	3	7	1	0.571 0	

可以看出，该厂标准件质量问题的影响因素有五个，相对重要程度依次为：职工、设

备、材料、生产管理、工艺。在职工方面存在的主要问题是技术水平低、思想不集中、片面追求数量、检验失职以及职工加班过多、过于劳累。可以看出,职工的技术素质及思想状况对该厂标准件产品质量起决定性作用,因此,该厂应在职工教育方面下大力气,一方面通过举办培训班,进行技术比武和劳动竞赛等办法迅速提高职工的文化技术素质;另一方面要在建立健全各种规章制度的同时大力加强职工的思想教育,提高工作热情,改变懒散的精神面貌。产品质量的另一个重要影响因素是生产设备方面的问题,主要是由机床精度低和刀具质量差引起的,机床精度低是由于设备陈旧的缘故,刀具质量差则是刀具厂产品质量不过关引起的。要解决这方面的问题,一是加快设备的更新改造,提高机床设备精度;二是提高刀具的质量。

[**例 6**] 挑选合适的工作。经双方恳谈,已有三个单位表示愿意录用某毕业生。该生根据已有信息建立了一个层次结构模型,如图 3-5 所示。

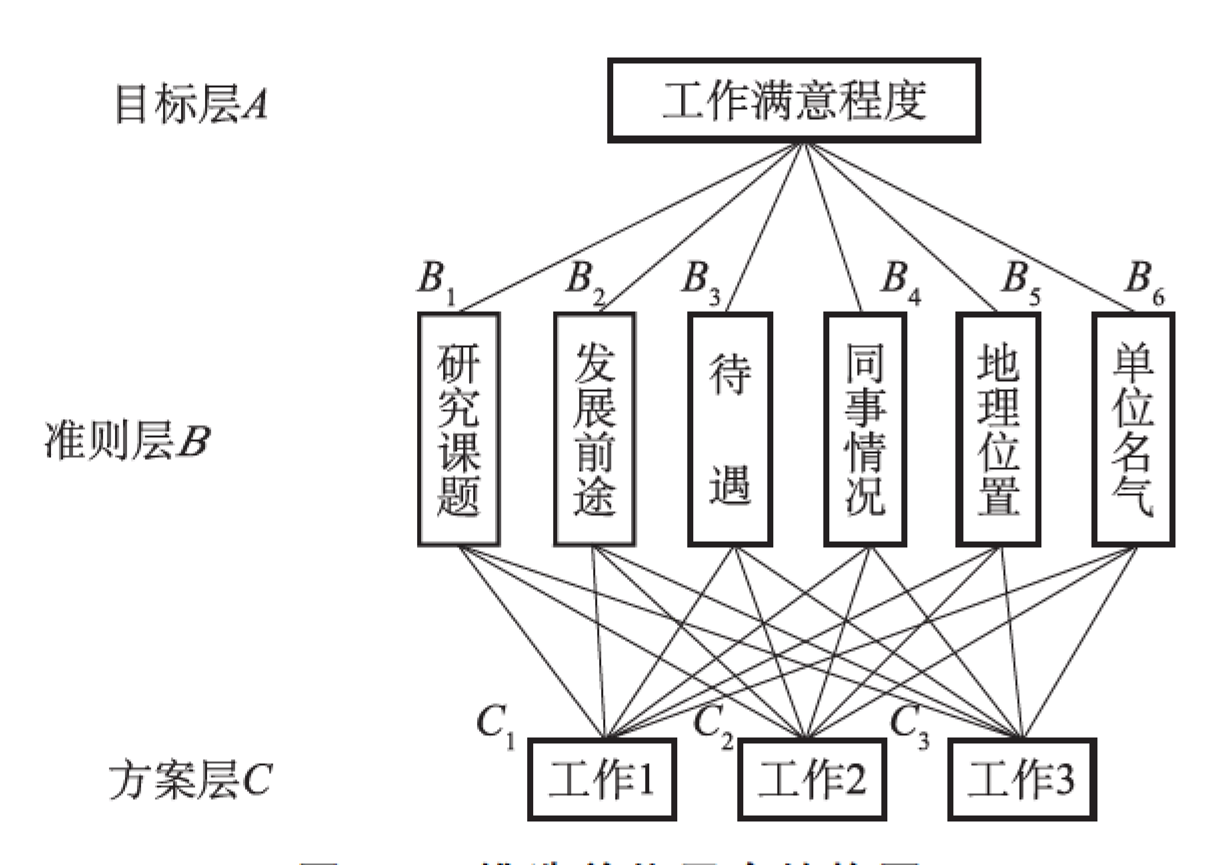


图 3-5 挑选单位层次结构图

目标层的判断矩阵为:

A	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
B_1	1	1	1	4	1	1/2
B_2	1	1	2	4	1	1/2
B_3	1	1/2	1	5	3	1/2
B_4	1/4	1/4	1/5	1	1/3	1/3
B_5	1	1	1/3	3	1	1
B_6	2	2	2	3	3	1

方案层的判断矩阵分别为:

B_1	C_1	C_2	C_3
C_1	1	1/4	1/2
C_2	4	1	3
C_3	2	1/3	1

B_2	C_1	C_2	C_3
C_1	1	1/4	1/5
C_2	4	1	1/2
C_3	5	2	1

B_3	C_1	C_2	C_3
C_1	1	3	1/3
C_2	1/3	1	7
C_3	3	1/7	1

B_4	C_1	C_2	C_3
C_1	1	1/3	5
C_2	3	1	7
C_3	1/5	1/7	1

B_5	C_1	C_2	C_3
C_1	1	1	7
C_2	1	1	7
C_3	1/7	1/7	1

B_6	C_1	C_2	C_3
C_1	1	7	9
C_2	1/7	1	1
C_3	1/9	1	1

试用层次分析法帮助该毕业生决策

［**解**］用层次分析法得到如表 3-23 所示。

表 3-23　层次排序结果

准则		研究课题	发展前途	待遇	同事情况	地理位置	单位名气	总排序权值
准则层权值		0.150 7	0.179 2	0.188 6	0.047 2	0.146 4	0.287 9	
方案层单排序权值	工作 1	0.136 5	0.097 4	0.242 6	0.279 0	0.466 7	0.798 6	0.395 2
	工作 2	0.625 0	0.333 1	0.087 9	0.649 1	0.466 7	0.104 9	0.299 6
	工作 3	0.238 5	0.569 5	0.669 4	0.071 9	0.066 7	0.096 5	0.305 2

根据层次总排序权值，该生最满意的工作为工作 1。

计算程序如下。

```
clc
a=[1,1,1,4,1,1/2
   1,1,2,4,1,1/2
   1,1/2,1,5,3,1/2
   1/4,1/4,1/5,1,1/3,1/3
   1,1,1/3,3,1,1
```

```
  2,2,2,3,3,1];
[x,y] = eig(a); lamda = max(diag(y));
[i,j] = find(y = = lamda);
ci1 = (lamda - 6)/5;cr1 = ci1/1.24
w1 = x(:,j)/sum(x(:,j))
b1 = [1,1/4,1/2;4,1,3;2,1/3,1];
[x,y] = eig(b1);lamda = max(diag(y));
[i,j] = find(y = = lamda);
ci21 = (lamda - 3)/2;cr21 = ci21/0.58
w21 = x(:,j)/sum(x(:,j))
b2 = [1  1/4   1/5;4   1   1/2;5   2    1];
[x,y] = eig(b2);lamda = max(diag(y));
[i,j] = find(y = = lamda);
ci22 = (lamda - 3)/2;cr22 = ci22/0.58
w22 = x(:,j)/sum(x(:,j))
b3 = [1    3  1/3;1/3   1    1/7;3   7    1];
[x,y] = eig(b3);lamda = max(diag(y));
[i,j] = find(y = = lamda);
ci23 = (lamda - 3)/2;cr23 = ci23/0.58
w23 = x(:,j)/sum(x(:,j))
b4 = [1   1/3   5;3   1    7;1/5  1/7   1];
[x,y] = eig(b4);lamda = max(diag(y));
[i,j] = find(y = = lamda);
ci24 = (lamda - 3)/2;cr24 = ci24/0.58
w24 = x(:,j)/sum(x(:,j))
b5 = [1   1    7;1   1    7;1/7  1/7   1];
[x,y] = eig(b5);lamda = max(diag(y));
[i,j] = find(y = = lamda);
ci25 = (lamda - 3)/2;cr25 = ci25/0.58
w25 = x(:,j)/sum(x(:,j))
b6 = [1   7   9;1/7  1   1 ;1/9   1   1];
[x,y] = eig(b6);lamda = max(diag(y));
```

```
[i,j]=find(y==lamda);
ci26=(lamda-3)/2;cr26=ci26/0.58
w26=x(:,j)/sum(x(:,j))
w_sum=[w21,w22,w23,w24,w25,w26]*w1
ci=[ci21,ci22,ci23,ci24,ci25,ci26];
cr=ci*w1/sum(0.58*w1)
```

第五节　群组决策

为方便决策科学化、民主化，一个复杂系统通常是有多位决策者（即专家）或决策部门参与决策的，由于决策者的地位、立场知识水平以及个人偏好的差异对同一个问题会有不同的判断，这些个体判断是否合理，如何把它们综合成一个较合理的结果就是所谓的群组决策问题。关于群组决策应做好以下几项工作：

（1）重视并做好专家咨询工作；

（2）群组决策综合方法。

我们仍然用特征根法，用特征根法进行综合时有两种处理方法：一种是将各位专家的判断矩阵综合得到综合判断矩阵，然后求出这个综合判断矩阵的排序向量；另一种是先求出各个专家判断矩阵的排序向量，然后将它们综合成群组排序向量，无论是从互反性、一致性上考虑以及计算机模拟计算分析，后一种方法均优于前一种方法。

方法一：加权几何平均综合排序向量法

对 S 个专家的判断矩阵 $\boldsymbol{A}_k = (a_{ij},k)$ 分别求出它们的排序向量：

$$\vec{\boldsymbol{w}}_k = (\varpi_{1,k},\varpi_{2,k},\cdots,\varpi_{n,k})^{\mathrm{T}},k=1,2,\cdots,s$$

然后求出它们的加权几何平均综合向量：

$$\vec{\boldsymbol{w}} = (\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n)^{\mathrm{T}}$$

其中，

$$\omega_j = \frac{\overline{w}_j}{\sum_{i=1}^{n} \overline{w}_j}, \overline{w}_j = (\omega_{j1})^{\lambda_1} (\omega_{j2})^{\lambda_2}, \cdots, (\omega_{js})^{\lambda_s}, \quad j = 1,2,\cdots,n$$;满足

$$\sum_{k=1}^{s} \lambda_k = 1$$

而 λ_k 为第 k 个专家的权重。当 $\lambda_1 = \lambda_2 = \cdots = \lambda_s$ 时，

$$\overline{w}_j = (\omega_{j1}, \omega_{j2} \cdots \omega_{js})^{\frac{1}{s}}, \quad j = 1,2,\cdots,n 。$$

计算 $\overline{w}_j$ 的标准差为

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{s-1} \sum_{k=1}^{s} (\omega_{jk} - \omega_j)^2},$$

相应于新的总体判断矩阵 $\boldsymbol{A} = (a_{ij}) = \left(\frac{\omega_i}{\omega_j}\right)$ 的总体标准差为

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{s-1} \sum_{k=1}^{s} (a_{ij,k} - a_{ij})^2}$$

以及个体标准差为

$$\lambda^{(k)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n} (\omega_{jk} - \omega_j)^2}$$

当总体标准差满足要求时，这组群组判断可采用。当个体 $\lambda^{(k)} < \varepsilon$ 时，认为第 k 个专家可通过，否则将信息反馈给有关专家，供修改时参考。

方法二：加权算术平均综合向量法

将各个专家判断矩阵得到的排序向量的加权算术平均作为综合排序向量：

$$\vec{w} = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n)$$

即

$$\omega_j = \lambda_1 \omega_{j1} + \lambda_2 \omega_{j2} + \cdots + \lambda_s \omega_{js}, \quad j = 1,2,\cdots,n$$

其中，$\sum_{k=1}^{s} \lambda_k = 1$ 。

当 $\lambda_1 = \lambda_2 = \cdots = \lambda_s = \frac{1}{s}$ 时

$$\omega_j = \frac{1}{s}(\omega_{j1} + \omega_{j2} + \cdots \omega_{js}), j = 1,2,\cdots,n$$

同样可计算标准差，并反馈信息给有关专家参考。

案例 2　自动步枪作战效能评价研究

一、引言

自动步枪是步兵完成战斗任务的主要武器，同时还广泛用于装备各兵种。今天，现代轻武器仍在突飞猛进地发展，随着新材料、新工艺、新结构和高新技术的大量运用，自动步枪作为轻武器的最主要代表，朝着小口径化、枪族化、轻量化、通用化、高精度化的方向发展，其作战效能更是产生了质的飞跃。分析研究我军和外军轻武器，尤其是步枪的性能和作战效能，是做好新时期军事斗争准备的一种具体体现，也是我们应当并且必须进行的一项重要的工作。

二、运用层次分析法对两种自动步枪进行效能评价

在步枪作战效能评价中，具体的结构层次为目标层、指标层及步枪型号层，其递阶层次划分如图 3-6 所示。

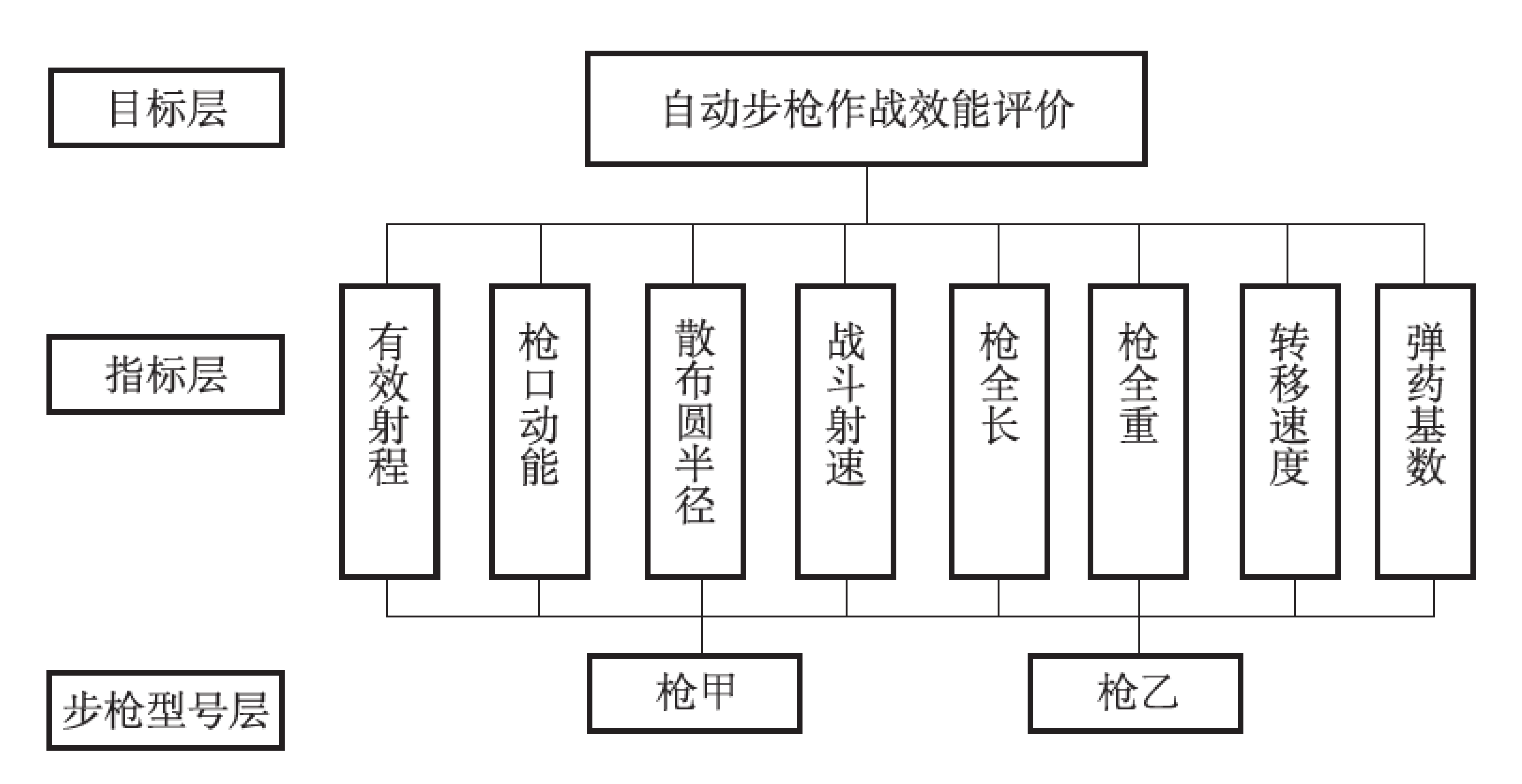


图 3-6　自动步枪的递阶层次分析

1. 确定各项指标关于目标的权重

根据经验评判，得到各项指标关于目标的判断矩阵 $\boldsymbol{A}_0$：

$$\boldsymbol{A}_0=\begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 1 & 4 & 4 & 4 \\ 3 & 1 & 3 & 5 & 3 & 6 & 6 & 6 \\ 1 & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 1 & 4 & 4 & 4 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} & 2 & 2 & 2 \\ 1 & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 1 & 4 & 4 & 4 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{6} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{6} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{6} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

利用 Matlab 软件计算得到 $\lambda_{0\max}=8.1208$，计算得到权重，亦即各项指标关于目标的权重为 $\boldsymbol{w}^0=(0.1576,\ 0.3388,\ 0.1576,\ 0.0660,\ 0.1576,\ 0.0408,\ 0.0408,\ 0.0408)^{\mathrm{T}}$。

2. 两种自动步枪各项指标的权重分析

假设两种自动步枪的技术指标和战术指标如表 3-24 所示。

表 3-24　两种自动步枪的技术指标和战术指标

项目	有效射程/m	枪口动能/kg·m	散布圆半径/cm	战斗射速/l 发/min	枪全长/mm	枪全重/kg	转移速度/lm/s	弹药基数/发
枪甲	400	218	12.25	100	1025	3.75	4.58	150
枪乙	400	179	8.75	115	764	3.5	5.2	300

武器作战效能中的重要性比较由武器各项指标值的大小决定。根据两两比较标度数值，可得到步枪型号层每种步枪相对于指标层每一个指标的比较标度，并由这些比较标度构成各种枪型相对于各项指标的判断矩阵，这些比较标度将在下面

的计算中出现在各个判断矩阵中。以下为分析计算：

根据两种自动步枪的技战术指标，得到两种自动步枪关于有效射程的判断矩阵为

$$\boldsymbol{A}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}，求得\ \lambda_{\max} = 2\ ,\ \boldsymbol{w}^1 = \left(\frac{1}{2} \quad \frac{1}{2}\right)^{\mathrm{T}}$$

经一致性检验，一致性指标为 CI=0。

所以，两种自动步枪关于有效射程的权重为

$$\boldsymbol{w}^1 = \left(\frac{1}{2} \quad \frac{1}{2}\right)^{\mathrm{T}}$$

同理可求得关于枪口动能的判断矩阵为 $\boldsymbol{A}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 5 \\ \frac{1}{5} & 1 \end{pmatrix}$，关于枪口动能的权重为 $\boldsymbol{w}^2 = \left(\frac{5}{6} \quad \frac{1}{6}\right)^{\mathrm{T}}$；

关于散布圆半径的判断矩阵为 $\boldsymbol{A}_3 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{3} \\ 3 & 1 \end{pmatrix}$，关于散布圆半径的权重为 $\boldsymbol{w}^3 = \left(\frac{1}{4} \quad \frac{3}{4}\right)^{\mathrm{T}}$；

关于战斗射速的判断矩阵为 $\boldsymbol{A}_4 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{3} \\ 3 & 1 \end{pmatrix}$，关于战斗射速的权重为 $\boldsymbol{w}^4 = \left(\frac{1}{4} \quad \frac{3}{4}\right)^{\mathrm{T}}$；

关于枪全长的判断矩阵为 $\boldsymbol{A}_5 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{5} \\ 5 & 1 \end{pmatrix}$，关于枪全长的权重为 $\boldsymbol{w}^5 = \left(\frac{1}{6} \quad \frac{5}{6}\right)^{\mathrm{T}}$；

关于枪全重的判断矩阵为 $\boldsymbol{A}_6 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{3} \\ 3 & 1 \end{pmatrix}$，关于枪全重的权重为 $\boldsymbol{w}^6 = \left(\frac{1}{4} \quad \frac{3}{4}\right)^{\mathrm{T}}$；

关于转移速度的判断矩阵为 $\boldsymbol{A}_7=\begin{pmatrix}1 & \frac{1}{5}\\ 5 & 1\end{pmatrix}$，关于转移速度的权重为 $\boldsymbol{w}^7=\begin{pmatrix}\frac{1}{6} & \frac{5}{6}\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$；

关于弹药基数的判断矩阵为 $\boldsymbol{A}_8=\begin{pmatrix}1 & \frac{1}{7}\\ 7 & 1\end{pmatrix}$，关于弹药基数的权重为 $\boldsymbol{w}^8=\begin{pmatrix}\frac{1}{8} & \frac{7}{8}\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$。

聚合权重排序为

$$\boldsymbol{w}=\boldsymbol{W}\boldsymbol{w}^0$$

其中，$\boldsymbol{W}$ 是以 $\boldsymbol{w}^1,\boldsymbol{w}^2,\cdots,\boldsymbol{w}^8$ 为列向量组成的矩阵，即

$$\boldsymbol{w}=\begin{pmatrix}1/2 & 1/2\\ 5/6 & 1/6\\ 1/4 & 3/4\\ 1/4 & 3/4\\ 1/6 & 5/6\\ 1/4 & 3/4\\ 1/6 & 5/6\\ 1/8 & 7/8\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}\cdot\begin{pmatrix}0.1576\\ 0.3388\\ 0.1576\\ 0.0660\\ 0.1576\\ 0.0408\\ 0.0408\\ 0.0408\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0.4603\\ 0.5397\end{pmatrix}$$

得到枪甲、枪乙的聚合权重为

$$w_1=0.4603,\quad w_2=0.5397$$

通过对比聚合权重，可得出枪乙的作战效能略优于枪甲。

三、运用 WSEIAC 模型进行作战效能评价

（一）作战效能评价数学模型的建立

根据美国工业界武器系统效能咨询委员会提出的 WSEIAC 模型，通常称为解析法，枪械系统作战效能可表示为 $E=\boldsymbol{ADC}$。式中，E 为枪械系统作战效能；$\boldsymbol{A}$ 为

可用度向量,是枪械系统在开始作战时所处状态的度量;**D** 为可信赖矩阵,是已知枪械系统作战开始时所处状态的条件下,在作战过程中所处状态的度量;**C** 为作战能力向量,是已知枪械系统作战过程中所处状态的条件下,枪械系统完成规定作战任务的能力的度量。

1. 可用度向量 *A* 的计算模型

可用度向量是枪械系统在开始作战时所处状态的度量,是一个行向量,则对于步枪,其工作状态可分为两种,初始可用度向量 **A** 可表示为

$$\boldsymbol{A}=(a_1,a_2)$$

式中,a_1 和 a_2 分别表示可用概率和不可用概率。

2. 可信赖矩阵 *D* 的计算模型

可信赖矩阵是已知枪械系统作战开始时所处状态的条件下,在作战过程中所处状态的度量,可描述为

$$\boldsymbol{D}=\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{pmatrix}$$

式中,d_{11} 为已知系统在开始执行任务时处于正常工作状态,在任务完成时该系统仍能正常工作的概率;d_{12} 为已知系统在开始执行任务时处于非常工作状态,在任务完成时该系统处于故障状态的概率;d_{21} 为已知系统在开始执行任务时处于故障状态,在任务完成时能正常工作的概率;d_{22} 为已知系统在开始执行任务时处于故障状态,在任务完成时该系统仍然处于故障状态的概率。

3. 作战能力向量 *C* 的计算

模型作战能力 **C** 是已知作战过程中所处状态的条件下,枪械系统完成规定任务的能力的度量,其计算模型为

$$\boldsymbol{C}=(c_1 \quad c_2)^{\mathrm{T}}$$

式中,c_i 为枪械系统处于状态 i 时完成作战任务的能力。

枪械子系统的层次分析模型如图 3-7 所示。

图 3-7 中,枪械子系统的作战能力值由机动能力、威力和生存能力三部分组成,根据陆军小分队作战机制来分析,这三者关系密切,为串联关系,可采用直接乘

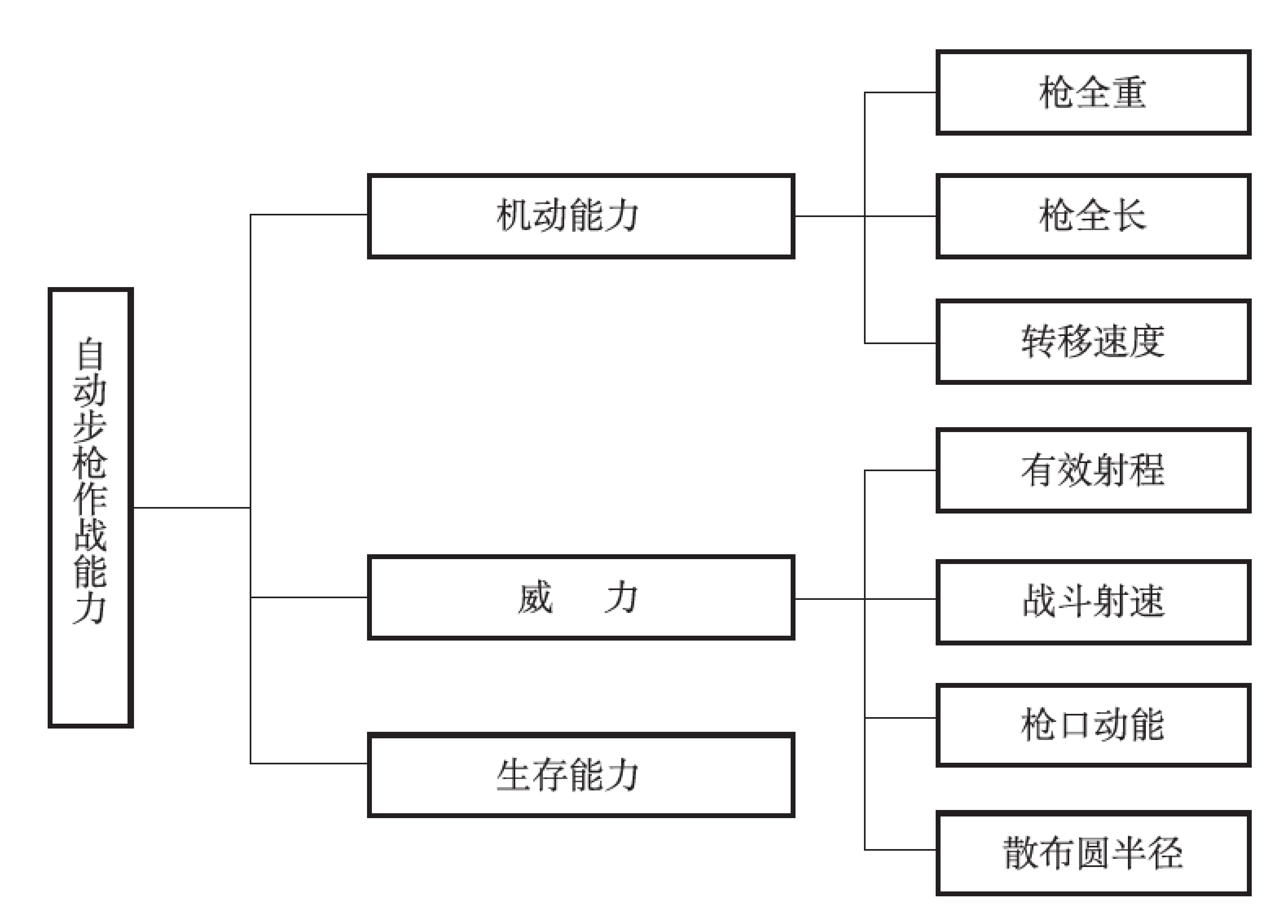


图 3-7　自动步枪作战能力分析

积的方法，计算模型为

$$c = c_m \cdot c_p \cdot c_s$$

式中，c_m 表示机动能力；c_p 表示威力；c_s 表示生存能力。

（二）对两种自动步枪进行作战效能评价

对选用的两种自动步枪，对比分析不同步枪在作战过程中的可用度、作战能力和作战效能。具体分析过程如下。

1. 可用度 *A* 的计算

两种不同类型枪械枪甲、枪乙，其组成的枪械系统各阶段的可靠性指标如表 3-25 所示

表 3-25　两种类型枪械各阶段的可靠性指标

可靠性指标	平均故障间隔时间/min	平均故障修复时间/min
枪甲	1 000	2
枪乙	1 200	3

由此可计算出这两种枪械系统的初始可用度为

$$\boldsymbol{A}_1=(0.998\,0\quad 0.002\,0),\quad \boldsymbol{A}_2=(0.997\,5\quad 0.002\,5)$$

2. 可信赖矩阵 $\boldsymbol{D}$

$$\boldsymbol{D}_1=\begin{pmatrix}0.998\,0 & 0.002\,0\\ 0.998\,0 & 0.002\,0\end{pmatrix},\boldsymbol{D}_2=\begin{pmatrix}0.997\,5 & 0.002\,5\\ 0.997\,5 & 0.002\,5\end{pmatrix}$$

3. 作战能力 $\boldsymbol{C}$ 的计算

首先将各指标能力实际值转化成不受量纲影响的相对评价值，假设两种枪械的各项基本性能指标（均为参考值）见表 3-25。通过计算得到规范化系数见表 3-26。

表 3-26 两种类型枪械性能指标规范化系数

项目	有效射程	枪口动能	散布圆半径	战斗射速	枪全长	枪全重	转移速度
枪 1	1	1	0.714	0.870	0.745	0.933	0.880
枪 2	1	0.821	1	1	1	1	1

机动能力与枪械重量、枪全长和转移速度有关，分别选择权重为 0.4，0.2 和 0.4。威力与有效射程、战斗射速、枪口动能和散布圆半径有关，分别选择权重为 0.3，0.2，0.2 和 0.3。

由于步枪在故障状态下，不能作战，所以求出两种不同枪械系统的作战能力 $\boldsymbol{C}$ 矩阵分别为

$$\boldsymbol{C}_1=(0.776\quad 0)^{\mathrm{T}},\quad \boldsymbol{C}_2=(0.964\quad 0)^{\mathrm{T}}$$

4. 枪械系统作战效能 $\boldsymbol{E}$ 的计算

最后，根据 $\boldsymbol{E}=\boldsymbol{ADC}$，即可计算出两种不同枪械的系统作战效能为

$$E_1=\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{D}_1\boldsymbol{C}_1=$$

$$(0.998\,0\quad 0.002\,0)\begin{pmatrix}0.998\,0 & 0.002\,0\\ 0.998\,0 & 0.002\,0\end{pmatrix}(0.776\quad 0)^{\mathrm{T}}=0.774$$

$$E_2=\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{D}_2\boldsymbol{C}_2=$$

$$(0.997\,5\quad 0.002\,5)\begin{pmatrix}0.997\,5 & 0.002\,5\\ 0.997\,5 & 0.002\,5\end{pmatrix}(0.964\quad 0)^{\mathrm{T}}=0.962$$

对比作战效能 E,得出枪乙的作战效能优于枪甲,与用层次分析法得出的结论是一致的。

四、结束语

适用于武器装备作战效能评价的方法甚多,每种方法所站的角度不同,利用的数学原理不尽相同,具体用哪一种方法进行评价要根据所处的环境和面临的实际情况而定。本案例针对自动步枪这一特殊装备,利用两种方法分别对两种自动步枪进行了作战效能评价,得出的结果是一致的,两种方法相互印证。



第一节　灰色系统基本理论

灰色系统是不完全信息的系统，适用于只有少量观测数据的项目。灰色系统理论是我国学者邓聚龙在1982年提出来的。它的研究对象是“部分信息已知，部分信息未知”的不确定性系统。他通过对部分已知信息的生成、开发，实现对现实世界的确切描述和认识。灰色系统理论主要是利用已知信息来确定系统的未知信息，使得系统由“灰”变“白”。

灰色系统理论主要研究以下几个方面的问题：灰色因素的关联分析、灰色建模、灰色预测、灰色决策、灰色系统分析、灰色系统控制、灰色系统优化等。其中，灰色决策评价方法是根据因素之间发展态势的相似或者相异程度来衡量因素间关联程度的方法。

一、灰色系统概述

（一）灰色系统的产生与发展

随着科学技术的高速发展，在现代社会的经济活动、科研活动以及人们的日常生活中，信息的交流已日趋重要，不可或缺。如何有效地提取、筛选、处理信息，已引起人们的普遍关注和高度重视。灰色系统理论正是因此应运而生的一门新兴学科。1982 年，北荷兰公司（North-Holland Co.）的《系统与控制通讯》（*System & Control Letter*）杂志上发表了我国学者邓聚龙教授的第一篇灰色系统论文《灰色系统的控制问题》（*The Control Problems of Grey System*）。1982 年第 3 期的《华中工学院学报》上发表了邓聚龙教授的第一篇中文灰色系统论文《灰色控制系统》。这标志着灰色系统理论经过其创始人邓聚龙教授多年卓有成效的努力，开始问世。这一新的理论刚一诞生，就受到国内外学术界和广大实际工作者的极大关注。不少著名学者和专家对该理论给予了充分肯定和支持。许多中青年学者纷纷加入灰色系统理论研究行列，以极大的热情开展理论探索及在不同领域中的应用研究工作。短短几年中，灰色系统理论已以其强大的生命力自立于科学之林，奠定了其作为一门新的交叉学科的学术地位。它的蓬勃生机和广阔的发展前景正日益广泛地被社会所认识、所重视。

（二）概念与研究内容

社会、经济、农业、工业、生态、生物等许多系统，是根据研究对象所属的领域和范围命名的，而灰色系统却是按照颜色来命名的。在控制理论中，人们常用颜色的深浅来形容信息的明确程度，如艾什比将内部信息未知的对象称为黑箱（Black Box）。这种理解和称谓已为人们普遍接受。再如在政治生活中，人民群众希望了解决策及其形成过程的有关信息，就提出要增加“透明度”。我们用“黑”表示信息未知，用“白”表示信息完全明确，用“灰”表示部分信息明确、部分信息不明确。相应地，我们将信息完全明确的系统称为白色系统，信息未知的系统称为黑色系统，部分信息明确、部分信息不明确的系统称为灰色系统。在人们的社会、经济活动或

科研活动中会经常遇到。如在农业生产中，即使是播种面积、种子、化肥、灌溉等信息完全明确，但由于劳动力技术水平、自然环境、气候条件等信息不明确，仍难以准确地预计出产量、产值。一般的社会经济系统，由于其没有明确的“内”、“外”关系，系统本身与系统环境、系统内部与系统外部的边界若明若暗，难以分析输入（投入）对输出（产出）的影响，同一个经济变量，有的研究者把它作为内生变量，而另一些研究者却把它作为外生变量，这是缺乏模型信息，找不到适当的系统模型或观测、控制变量。

综上所述，系统信息不完全的情况有以下四种：

（1）元素（参数）信息不完全；

（2）结构信息不完全；

（3）边界信息不完全；

（4）运行行为信息不完全。

“信息不完全”是“灰”的基本含义。从不同的场合、不同的角度看，还可以将“灰”的含义加以引申。“信息非完全”原理的运用是“少”与“多”的辩证统一，是“局部”与“整体”的转化，也是灰色系统理论研究问题的根本特征。“非唯一性”原理是灰色系统解决问题所遵循的基本思路。

灰色概念与模糊概念的主要区别在于研究对象的内涵与外延的性质。灰色系统着重外延明确、内涵不明确的对象，模糊数学着重外延不明确、内涵明确的对象。灰概念与随机概念没有本质的区别，灰色系统与随机理论研究问题、解决问题的方法和思路则截然不同。

灰数、灰元、灰关系是灰色系统的主要研究对象。因此，灰数及其运算、灰色矩阵与灰色方程是灰色系统理论的基础。工业控制及社会、经济、农业、生态等本征性灰系统的分析、建模、预测、决策和控制是灰色系统的主要研究任务。

对一个问题的研究往往同时需要若干方面综合进行。首先要对现状进行分析，在此基础上建立系统模型，对未来做出科学、可信的预测，选准重点，进行有效的决策与控制，从而达到最优的综合效益。这同时包含了分析、建模、预测、决策和控制几个方面的内容。运用灰色理论进行系统分析主要包括灰色关联分析、灰色统计和灰色聚类等方面的内容；系统建模主要通过数的生成或序列算子作用，寻找其规律，然后根据灰色理论的五步建模思想完成系统建模。

五步建模的具体步骤为：

第一步，语言模型；

第二步，网络模型；

第三步，量化模型；

第四步，动态量化模型；

第五步，优化模型。

灰色预测是基于 CM(1,1)进行的定量预测，按照其功能和特征可分成数列预测、区间预测、灾变预测、季节灾变预测、拓扑预测和系统预测六类。灰色控制的主要内容包括本征性灰系统的控制问题和以灰色系统方法为主构成的控制，如灰关联控制和 GM(1,1)预测控制等。概括起来，灰色系统理论的研究内容包括关联分析、生成、灰色建模、灰色预测、灰色决策和灰色控制等。

针对灰色系统理论的应用，本书将重点放在灰色系统建模及较常用的灰关联分析，其他相关理论可参照相关参考书。

二、灰色系统数学描述

1. 灰数

灰数是客观系统中大量存在着的随机的、含混的、不确知的参数的抽象。所以灰数不是一个数，而是在指定范围内变化的所有白数(确切数值的数)的全体，或者说是一群数、一个整体数。某个只知大概范围，而不知其准确数值的全体实数，称为灰数，记为 $\otimes$ 。令 a 为区间，a_i为 a 中的数，若灰数 $\otimes$ 在 a 内取值，则 a_i为 $\otimes$ 的一个白化值。为此可有下述符号：

$\otimes$ 为一般灰数；$\tilde{\otimes}(a_i)$ 为以 a_i为白化值的灰数；$\tilde{\otimes}$ 或 $\tilde{\otimes}(a_i)$ 是灰数的白化值。注意：$\tilde{\otimes}$ 或 $\tilde{\otimes}(a_i)$ 可以是 a_i，也可以不是 a_i，这要取决于取数时所获得的补充信息。比如，海豹的重量为在 20～25kg，即海豹的重量是灰数 $\otimes$ ，可记为 $\tilde{\otimes} \in [20,25]$ ，或 $\tilde{\otimes}(22.5) \in [20,25]$ ，(这里 22.5 是一个可能的白化值)。如果指定了某个海豹(这叫补充信息)，其重量为 22.5kg，则记为 $\tilde{\otimes}(22.5)=22.5$，如果某海

豹的重量为22kg，则记为$\tilde{\otimes}(22.5)=22$，意指以22.5为白化值的海豹灰重量的白化值为22kg。

根据灰数的不同取值，灰数可分为几下几种：

（1）有下界的灰数

有下界的灰数指有下界面无上界面的灰数。记为$\otimes \in [a,\infty)$或$\otimes(a)$，$\tilde{\otimes}=a$，其中a为灰数$\otimes$的下确界，通常称$[a,\infty)$为灰数$\otimes$的值域（取值域）或灰域。

（2）有上界的灰数

有上界的灰数指有上界面而无下界面的灰数。记为$\otimes \in (-\infty,a]$或$\tilde{\otimes}(a) \in (-\infty,a]$，$\otimes(a) \in (-\infty,a]$，其中$a$为灰数$\otimes$的上确界，是白数。

（3）区间灰数

区间灰数指具有上、下界$\underline{a}$，$\bar{a}$的灰数称为区间灰数，记为$\otimes \in [\underline{a},\bar{a}]$。

根据灰数的连续或离散情况，灰数可分为：

①连续灰数，指灰域连续的灰数。

②离散灰数，指灰域离散的灰数。

根据能否找到"白数"作为灰数"代表"的情况，灰数可分为：

① 本征灰数，指远不可能，或暂时还不可能找到一个白数作为灰数"代表"的数。

② 非本征灰数，指凭先验信息，或间接手段可以找到一个白数作为灰数的"代表"的数。

根据构成机理的不同情况，灰数可分为：

① 信息型灰数，指暂时缺乏信息而不能肯定其确切值的灰数。

② 观念型灰数，指由人们的某种观念、意愿而形成的灰数。

③ 层次型灰数，指认识层次改变后形成的灰数。

因为灰数是一个整体数、一个区间数、一个集合数，所以在处理有关灰数的问题时，势必带来一定的困难。为了量化处理的需要，灰色系统理论自然要以"白化"为己任，这就提出了灰数的白化问题。所谓灰数白化，就是将取不确定值的灰数，按照白化权函数取一确定值。白化权函数类似于概率分布曲线，又像模糊数学中的隶属度函数，不过它的作用、意义与成因与前二者均不同。

2. 灰函数

一般函数的定义是：设 $\mathbf{R}$ 为实数集，$x \in \mathbf{R}$，对于 $\forall x \in X$，存在唯一的 $y \in Y \subset \mathbf{R}$，使 $y=f(x)$ 或 $\{(x,y) \mid x \in \mathbf{R}, y \in Y, y=f(x)\}$。但在灰色理论中，对于确定的 $\forall x \in X$，得不到一个确定的 $y \in Y$ 与之对应，而只知道区间 $[a,b] \subset Y$ 的某些点与之对应。灰函数的正式定义为：

设 $\mathbf{R}$ 为实数集，l 为所有闭区间族所成的集，下述映射：

$$f_l: X \to l(X \subset \mathbf{R})$$

即 $\forall x \in X$，$\exists$ $I \in l, x \to I$，使 $I = f_l(x)$，则称 f_l 为区间灰函数，简称灰函数，记为 $\otimes(f(x))$。

仿照一般映射的表示，上述灰函数也可表示为

$$\{(x, I_x) \mid x \in \mathbf{R}, I_x \in I, I_x = f_l(x)$$

注意：灰函数不是每一点皆“灰”，在有的点它也可能是“白”的。显然，一般的白函数是灰函数的特例。

3. 灰方程与灰矩阵

(1)灰代数方程

含有灰数(或灰元)的方程，称为灰代数方程。如

$$f(\otimes x) + 1 = 0$$

是含一个灰数的一元一次灰代数方程。显然，灰方程并不是一个方程，而是多个方程的代数符号。它代表的方程个数，取决于灰元 $\otimes$ 的取值。

(2)灰微分方程

含灰导数的微分方程称为灰微分方程。如

$$\otimes(a^{(2)}, K) + a \otimes (a^{(1)}, K) + b \otimes (a^{(0)}, K) = \mu$$

式中，$\otimes(a^{(i)}, K), i = 0,1,2$ 表示 i 阶灰导数；a, b, μ 表示白系数。

(3)灰矩阵

含有灰元的矩阵称为灰矩阵。如 $\mathbf{A}(\otimes) = \begin{bmatrix} \otimes_{11}, a_{12} \\ a_{21}, a_{22} \end{bmatrix}$ 是灰矩阵。

因为矩阵 $\mathbf{A}$ 中含有灰元，即 $a_{11} = \otimes_{11}$。

$\otimes(\boldsymbol{A})=\begin{bmatrix}\otimes(a_{11}),\otimes(a_{12})\\a_{21},a_{22}\end{bmatrix}$ 也是灰矩阵。$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}a_{11},a_{12}\\a_{21},a_{22}\end{bmatrix}$ 它是以 $\boldsymbol{A}$ 为白化矩阵的灰矩阵。

4. 灰线性空间

记 $E(\otimes)$ 为性质与元素符号不指定的灰集合，对于 $\forall\ \otimes_1,\otimes_2,\otimes_3\in E(\otimes)$，若有：

(1) $\otimes_1+\otimes_2=\otimes_2+\otimes_1$；

(2) $(\otimes_1+\otimes_2)+\otimes_3=\otimes_1+(\otimes_2+\otimes_3)$；

(3) $E(\otimes)$ 中存在零元素“0”，使 $\otimes+0=\otimes$；

(4) $\forall\ \otimes\in E(\otimes)$，$E(\otimes)$ 中存在负元素“$-\otimes$”，使 $\otimes+(-\otimes)=0$。

对于 $\forall\ \otimes_\alpha,\otimes_\beta\in E_1(\otimes)$，$\forall\ \otimes\in E_2(\otimes)$ 都有集合 E 中元素 $\otimes_\alpha\otimes$ 与之对应，且有

(5) $\otimes_\alpha(\otimes_\beta\otimes)=(\otimes_\alpha\otimes_\beta)\otimes$；

(6) $1\cdot\otimes=\otimes$；

(7) $(\otimes_\alpha+\oplus_\beta)\otimes=\otimes_\alpha\otimes+\otimes_\beta\otimes$；

(8) $\otimes_\alpha(\otimes_1+\otimes_2)=\otimes_\alpha\otimes_1+\otimes_\alpha\otimes_2$；

则称 E 为灰线性空间，$\otimes_i$ 为取数一致灰数。

5. 灰集合

灰元的集合称为灰集合。记为

$$A=\{\otimes\}\cup R^1$$

式中，R^1 全体确知实数的集合。

有时记 $E_r(\otimes,\alpha)$ 为元素符号是 α 具有性质 T（按指定方式考虑灰数具体值的性质）的灰元的集合，而记 $E_r(0,\alpha)$ 为元素符号是 α 具有性质 T 的白数的集合。

在灰代数中，对任意一个灰集合，如果赋予一个适合一定条件的运算，使它成为一个灰色群、环等，就是说这个灰集合具有一个代数结构，就可以在其中进行代数问题的研究。

6. 灰数列

若用 $\mathbf{N}$ 表示自然数集，用

$$\{\alpha(t), t \in \mathbf{N}\}, \forall \alpha(t) \geqslant 0$$

表示非负数列，则

(1) $\{\alpha(t), t \in \mathbf{N}\}, \forall t \in \mathbf{N}, \alpha(t) \geqslant 0$

称为非负白色数列。

(2) $\{\alpha(t), t \in \mathbf{N}\}, \forall t \in \mathbf{N}, \exists \alpha(\tau) = \otimes(\tau) \geqslant 0,$

$\alpha(t) \geqslant 0, t \neq \tau, t, \tau \in \mathbf{N},$

称为非负灰色数列。

(3) $\{\alpha(t), t \in \mathbf{N}\}, \forall t \in \mathbf{N}, \exists \alpha(\tau) = \otimes(\tau),$

$\alpha(t) \geqslant 0, t \neq \tau, t, \tau \in \mathbf{N},$

有变换

$\{\otimes(\tau)\} \rightarrow \{\alpha(t)\}, \tau \in \{l, l+m\} \subset \mathbf{N}$

$\{\otimes(\tau)\}$ 为灰数的全体，$\{\alpha(i)\}$ 为白数集，则称数列：$\{\alpha(i), i \in \mathbf{N}\}$ 为灰色数列，$\{\alpha(t), t \in \mathbf{N}\}$ 为白化数列。

第二节　灰色系统应用

本部分主要介绍灰色系统理论应用最广泛的灰关联分析。

一、灰关联分析的基本思想

一般的抽象系统如社会系统、经济系统、农业系统、生态系统、农机系统、教育系统等都包含许多种因素，多种因素共同作用的结果决定系统的发展态势。我们常常希望知道在众多的因素中，哪些是主要因素，哪些是次要因素，哪些因素对系

统发展影响大，哪些因素对系统发展影响小，哪些因素对系统发展起推动作用，需强化发展，哪些因素对系统发展起阻碍作用，需加以限制，这些都是系统分析中人们普遍关心的问题。如粮食生产系统，我们希望提高粮食总产量，而影响粮食总产的因素是多方面的，如高播种面积以及水利、肥料、土壤、种子、劳力、气候、耕作技术和政策环境等。为了达到少投入多产出，并取得良好的经济效益、社会效益和生态效益，就必须进行系统分析。数理统计中的回归分析、方差分析、主成分分析等都是用来进行系统分析的方法。这些方法具有下述不足之处：

（1）要求有大量数据，数据量少就难以找到统计规律；

（2）要求样本服从某个典型的概率分布，要求各因素数据与系统特征数据之间呈线性关系，这种要求十分苛刻，难以满足；

（3）计算量大，一般要靠计算机帮助；

（4）可能出现量化结果与定性分析结果不符的现象，导致系统的关系和规律遭到歪曲和颠倒。

灰关联分析方法弥补了用数理统计方法做系统分析所导致的缺憾。它对样本量的多少和样本有无规律都同样适用，而且计算量小，十分简便，更不会出现量化结果与定性分析结果不符的情况。

灰关联分析的基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密。曲线越接近，相应序列之间的关联度就越大；反之就小。

二、灰关联分析的基本概念与方法

寻求系统中各因素间的主要关系，找出影响目标值的重要因素，从而掌握事物的主要特征，促进和引导系统迅速而有效地发展，这是对一个系统发展变化态势的定量描述和比较的方法。发展态势的比较，依据空间理论的数学基础，按照规范性、偶对对称性、整体性和接近性这四条原则，确定参考数列（母数列）和若干比较数列（子数列）之间的关联系数和关联度。

若记经数据变换的母序列为 $\{x_{(0)}(t)\}$，子序列为 $\{x_{(i)}(t)\}$，则在时刻 $t=k$ 时，$\{x_{(i)}(k)\}$ 与 $\{x_{(0)}(k)\}$ 的关联系数 $\xi_{0j}(k)$ 用下式计算：

$$\xi_{0j}(k)=\frac{\Delta_{\min}+\rho\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k)+\rho\Delta_{\max}},\quad j=1,2,\cdots,N$$

式中，N 为序列的长度即数据个数。

显然，关联度与下列因素有关：

（1）母序列 x_0 不同，则关联度不同；

（2）子序列 x_i 不同，则关联度不同；

（3）数据变换不同（即参考点 0 不同），则关联度不同；

（4）数列长度不同（即数据个数 N 不同），则关联度不同；

（5）分辨系数 ρ 不同，则关联度不同。

由此可见，关联度不是唯一的。

一般来说，关联度满足等价"关系"三公理，即

（1）自反性：$\gamma_{00}=1$；

（2）对称性：$\gamma_{0i}=\gamma_{i0}$；

（3）传递性：$\gamma_{0a}>\gamma_{0b}$；$\gamma_{0b}>\gamma_{0c}$，则 $\gamma_{0a}>\gamma_{0c}$。

1. 数据计算变换

系统中各因素的物理意义不同，导致数据的量纲也不一定相同，如劳动力为人、产值为万元、产量为吨等。而且有时数值的数量级相差悬殊，如人均收入为几百元，粮食亩产为几千斤，而费用为几十万元，产业产值有的几万元，有的却达百亿元等，这样在比较时就难以得到正确的结果、为了便于分析，保证各因素具有等效性和同序性，因此需要对原始数据进行处理，使之无量纲化和归一化，即数据变换。

在灰关联分析中进行数据变换一般有初始化处理、均值化处理、区间值化处理三种方法。

（1）初始化处理

对一个数列的所有数据均用它的第一个数去除，从而得到一个新数列的方法叫初值化处理。这个新数列表明原始数列中不同时刻的值相对于第一个时刻值的倍数。该数列有公共起点，无量纲，其数据值均大于 0。

设有原始数列

$$x^{(0)}=\{x^{(0)}(1),x^{(0)}(2),\cdots,x^{(0)}(n)\}$$

对 $x^{(0)}$ 做初始化处理得 $y^{(0)}$，则

$$\begin{aligned} y^{(0)} &= \{y^{(0)}(1), y^{(0)}(2), \cdots, y^{(0)}(n)\} \\ &= \left\{\frac{x^{(0)}(1)}{x^{(0)}(1)}, \frac{x^{(0)}(2)}{x^{(0)}(1)}, \cdots, \frac{x^{(0)}(n)}{x^{(0)}(1)}\right\} \end{aligned}$$

(2)均值化处理

对一个数列的所有数据用它的平均值去除，从而得到一个新数列的方法叫均值化处理。这个新数列表明原始数列中不同时刻的值对平均值的倍数。该数列无量纲，其数据值大于0。

设有原始数列

$$x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \cdots, x^{(0)}(n)\}$$

记其平均值为 $\overline{x^{(0)}}$ ，则

$$\overline{x^{(0)}} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} x^{(0)}(k)$$

对 $x^{(0)}$ 做均值化处理，得 $y^{(0)}$ 为

$$\begin{aligned} y^{(0)} &= \{y^{(0)}(1), y^{(0)}(2), \cdots, y^{(0)}(n)\} \\ &= \left\{\frac{x^{(0)}(1)}{\overline{x^{(0)}}}, \frac{x^{(0)}(2)}{\overline{x^{(0)}}}, \cdots, \frac{x^{(0)}(n)}{\overline{x^{(0)}}}\right\} \end{aligned}$$

(3)归一化处理

在非时间序列中，同一序列有许多不同的物理量，且其数值大小相差过分悬殊，为避免造成非等权情况，对这些数列做归一化处理。

2. 关联序与关联矩阵

(1)关联序

因为关联度不是唯一的，所以关联度本身的多少不是关键，而各关联度大小的排列顺序则更为重要，这便得关联序。

将 M 个子序列对同一母序列的关联度按大小顺序排列起来，便组成关联序。它反映了对于母序列来说各子序列的“优劣”关系。

若 $r_{0a} > r_{0b}$ ，则称 $\{x_a\}$ 对于同一母序列 $\{x_0\}$ 有优于 $\{x_b\}$ 的特点，记为

$$\{x_a \mid x_0\} \succ \{x_b \mid x_0\}$$

若 $r_{0a} < r_{0b}$ ，则称 $\{x_a\}$ 对于同一母序列 $\{x_0\}$ 有劣于 $\{x_b\}$ 的特点，记为

$$\{x_a \mid x_0\} \prec \{x_b \mid x_0\}$$

设有 m 个单位，每个单位用 n 个指标描述，则组成指标列：

$$x_1 = \{x_1(1), x_1(2), \cdots, x_1(n)\}$$
$$x_2 = \{x_2(1), x_2(2), \cdots, x_2(n)\}$$
$$\vdots$$
$$x_m = \{x_m(1), x_m(2), \cdots, x_m(n)\}$$

上述指标按相同指标又可组成数据列：

$$x(1) = \{x_1(1), x_2(1), \cdots, x_m(1)\}$$
$$x(2) = \{x_1(2), x_2(2), \cdots, x_m(2)\}$$
$$\vdots$$
$$x(n) = \{x_1(n), x_2(n), \cdots, x_m(n)\}$$

对数据列采用区间值化处理，其对应的新数列记为

$$y(1) = \{y_1(1), y_2(1), \cdots, y_m(1)\}$$
$$y(2) = \{y_1(2), y_2(2), \cdots, y_m(2)\}$$
$$\vdots$$
$$y(n) = \{y_1(n), y_1(n), \cdots, y_m(n)\}$$

在上述新数列中，若做纵向区间值化处理，则

$$y_j(1) = \frac{x_j(1) - \min\limits_i x_j(1)}{\max\limits_i x_i(1) - \min\limits_i x_j(1)}$$
$$y_j(2) = \frac{x_j(2) - \min\limits_i x_j(2)}{\max\limits_i x_i(2) - \min\limits_i x_j(2)}$$
$$\vdots$$
$$y_j(n) = \frac{x_j(n) - \min\limits_i x_j(n)}{\max\limits_i x_i(n) - \min\limits_i x_j(n)}$$

将 M 个子序列对同一母序列的关联度按大小顺序排列起来，便组成关联序。它反映了对于母序列来说各子序列的“优劣”关系。

(2) 关联矩阵

若有 n 个母序列

$$\{y_1\}, \{y_2\}, \cdots, \{y_n\}, \quad n \neq 1$$

并有 m 个子序列

$$\{x_1\},\{x_2\},\cdots,\{x_m\},\quad m \neq 1$$

则各子序列对母序列有关联度为 $[r_{11},r_{12},\cdots,r_{1m}]$，

各子序列对母序列有关联度为 $[r_{21},r_{22},\cdots,r_{2m}]$。

将 $r_{ij}(i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m)$ 做适当排列，可得到关联度矩阵。

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

关联度矩阵简称为关联矩阵。利用它可作为“优势”分析的基础，也可作为决策的依据。根据以上几种关系，可定义两种有代表性的关联序，即“有序”和“偏序”。

若关联序 $\{x\}$ 是有序的，则它所有元素之间必存在下列关系之一：“优于” $>$；“劣于” $<$；“等价于” $\sim$。若关联序 $\{x\}$ 为偏序，则并不是所有元素都可以比较的。

一般来说，各因素只要能构成关系，只要能算出关联度，则总是“有序”的。只有当无参考点，或无参考母序列时，才有可能出现“偏序”现象。

3. 优势分析

若 $\boldsymbol{R}$ 矩阵的第 3 列各元素大于其他各列，即

$$\begin{bmatrix} r_{13} \\ r_{23} \\ r_{33} \\ r_{43} \\ r_{53} \end{bmatrix} > \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{21} \\ r_{31} \\ r_{41} \\ r_{51} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} r_{13} \\ r_{23} \\ r_{33} \\ r_{43} \\ r_{53} \end{bmatrix} > \begin{bmatrix} r_{12} \\ r_{22} \\ r_{32} \\ r_{42} \\ r_{52} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} r_{13} \\ r_{23} \\ r_{33} \\ r_{43} \\ r_{53} \end{bmatrix} > \begin{bmatrix} r_{14} \\ r_{24} \\ r_{34} \\ r_{44} \\ r_{54} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} r_{13} \\ r_{23} \\ r_{33} \\ r_{43} \\ r_{53} \end{bmatrix} > \begin{bmatrix} r_{15} \\ r_{25} \\ r_{35} \\ r_{45} \\ r_{55} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} r_{13} \\ r_{23} \\ r_{33} \\ r_{43} \\ r_{53} \end{bmatrix} > \begin{bmatrix} r_{16} \\ r_{26} \\ r_{36} \\ r_{46} \\ r_{56} \end{bmatrix}$$

则称第 3 个子因素 $\{x_3\}$ 为优势子因素。

矩阵各列的比较，是指列中相应元素的比较。比如，第 3 列大于第 1 列，即表示：

$$r_{13}>r_{21},r_{23}>r_{21},r_{33}>r_{31},r_{43}>r_{41},r_{53}>r_{31}$$

如果 $\boldsymbol{R}$ 中某一行的各元素均大于其他各行，则该行的母因素为优势母因素。根据矩阵中各行或各列关联度的大小判断子因素与母因素的作用，分析哪些因素是主要的影响因素，哪些是次要的影响因素，起主要影响作用的因素为优势因素。

因此相应的有优势子因素和优势母因素。

比如有 5 个母因素 $\{y_1\},\{y_2\},\{y_3\},\{y_4\},\{y_5\}$，6 个子因素 $\{x_1\},\cdots,\{x_6\}$，可得关联矩阵为

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} r_{11},r_{12},r_{13},r_{14},r_{15},r_{16} \\ r_{21},r_{22},r_{23},r_{24},r_{25},r_{26} \\ r_{31},r_{32},r_{33},r_{34},r_{35},r_{36} \\ r_{41},r_{42},r_{43},r_{44},r_{45},r_{46} \\ r_{51},r_{52},r_{53},r_{54},r_{55},r_{56} \end{bmatrix}=\begin{Bmatrix} \text{第 1 个母因素对 6 个子因素的 6 个关联度} \\ \text{第 2 个母因素对 6 个子因素的 6 个关联度} \\ \text{第 3 个母因素对 6 个子因素的 6 个关联度} \\ \text{第 4 个母因素对 6 个子因素的 6 个关联度} \\ \text{第 5 个母因素对 6 个子因素的 6 个关联度} \end{Bmatrix}$$

如果 $\boldsymbol{R}$ 为下三角矩阵，则因为第 1 列元素是满的，故称第 1 个子因素为潜在优势子因素。如果第 1 列元素大于其他各列相应元素，则第 1 个子因素为优势子因素，而第 2 列元素中只有一个元素为零，故称第 2 个子因素为潜在优势子因素。

4. 灰关联空间

(1)关联四公理

令 X 为灰关联因子集，$x_0 \in X$ 为母因素(参考序列)，$x_i \in X$ 为子因素(比较序列)，$x_0(k),x_i(k)$ 分别为 x_0 与的第 k 点的数。若 $r(x_0(k),x_i(k))$ 为实数，有

$$r(x_0,x_i)=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}r(x_0(k),x_i(k))$$

为 $r(x_0(k),x_i(k))$ 的平均值，当满足

① 规范性

$$0<r(x_0,x_i)\leqslant 1$$
$$r(x_0,x_i)=1\leftrightarrow x_0=x_i$$
$$r(x_0,x_i)=0\leftrightarrow x_0,x_i\in \Phi,\Phi \text{ 为空集。}$$

② 偶对对称性

$$x_0,x\in X$$
$$r(x_0,x_i)=r(x_i,x_0)\leftrightarrow X=\{x_\sigma \mid \sigma=0,i\}\text{ 。}$$

③ 整体性

$$r(x_j,x_i)=r(x_i,x_j),x_j,x_i\in X\Leftrightarrow X=\{x_\sigma \mid \sigma=0,1,\cdots,n\},\quad n>2$$

④ 接近性

$$|x_0(k)-x_i(k)| \text{ 越小,则 } r(x_0(k),x_i(k)) \text{ 越大。}$$

则称 $r(x_0,x_i)$ 为 x_i 对 x_0 的关联度,称 $r(x_0(k),x_i(k))$ 为 x_i 对 x_0 的关联系数,记为 $\xi_{ij}(k)$ 。上述①～④四个条件称为灰关联四公理。

规范性表明,系统中任何因子都不可能是严格无关联的。

偶对对称性表明,灰关联因子集中,只有两个因子时,则 $r(x_0,x_j)$ 为两两比较,两两比较是对称的。

整体性表明,比较结果不一定符合对称原理。(因为环境不同,参考序列的取舍不同)

接近性表明对灰关联度量化的约束。

(2)灰关联映射

若 $r(x_0,x_i)$ 满足灰关联四公理,则称 r 为灰关联映射。

(3)灰关联空间

若 Γ 为灰关联映射的全体,$r\in\Gamma$ 满足灰关联四公理,X 为灰关联因子集,则称(X ,Γ)为灰关联空间,称 r 为 Γ 中特定映射。

5. 光滑离散函数与光滑度

(1)光滑离散函数

设(X,Γ) 为关联子空间,r 为 Γ 的特定映射,$x^{(0)}$ 是 X 的点,则

$$x^{(0)}=(x^{(0)}(1),x^{(0)}(2),\cdots,x^{(0)}(n))$$

$z^{(0)}$ 是 $x^{(0)}$ 的均值生成离散函数。

$$z^{(0)}=(z^{(0)}(1),z^{(0)}(2),\cdots,z^{(0)}(n))$$

x^* 是指定可导函数的离散形式,$\varepsilon_1,\varepsilon_2$ 是$[0,1]$上指定的数,称 $x^{(0)}$ 是特定映射 γ 下光滑的离散函数,当且仅当它满足下述条件:

① k 足够大时,$x^{(0)}(k)<\sum_{i=1}^{k-1}x^{(0)}(i)$;

② $\max_k|x^*(k)-x^{(0)}(k)|\geqslant\max_k|x^*(k)-z^{(0)}(k)|$;

③ $r(x^*,x^{(0)})\geqslant\varepsilon_1,r(x^*,z^{(0)})\geqslant\varepsilon_2$;

④ $\varepsilon_2\geqslant\varepsilon_1$ 。

(2)光滑度

光滑度指光滑离散函数的光滑程度。其定义为:设 $x^{(0)}$ 为光滑离散函数,$z^{(0)}$

为 $x^{(0)}$ 的均值生成函数，(X, Γ) 为关联子空间，r 为 Γ 的特定映射，$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon$ 均为 $[0,1]$ 上特定实数，x^* 是指定的可导函数的离散形式，当：

(1) $r(x^*, x^{(0)}) \geqslant \varepsilon_1$ ；

(2) $r(x^{(0)}, z^{(0)}) \geqslant \varepsilon_2$ ；

(3) $\varepsilon_2 \geqslant \varepsilon_1$ ；

(4) $|r(x^*, x^{(0)}) - r(x^*, z^{(0)})| \leqslant \varepsilon$ ；

(5) $x^{(0)}, z^{(0)}, x^* \in X$ ；

则称 $x^{(0)}$ 是 (X,Γ) 中光滑度大于 $\frac{1}{\varepsilon}$ 的离散函数，称

$$S(r) = |r(x^*, x^{(0)}) - r(x^*, z^{(0)})|$$

为空间 (X,Γ) 的特定映射 r 下 $x^{(0)}$ 的光滑度。

三、算例

关联分析计算方法，一般包括下列计算和步骤：①原始数据变换；②计算关联系数；③求关联度；④排关联序；⑤列关联矩阵。在应用过程中，根据情况和要求，不一定全部进行。

［**例 1**］　已知某镇 2012—2013 年工业产值(万元)、技术水平(%)、固定资产(万元)、劳动力人数(万人)等四项指标的数据如表 4-1 所示。试做关联分析，以 x_0 为母因素，$x_i(i = 1,2,3)$ 为子因素，计算关联度。

表 4-1　某镇四项指标数据

年份	1980	1981	1982	1983
工业产值	8 222	9 077	9 818	10 912
技术水平	0.889 3	0.903 7	0.915 0	0.973 9
固定资产	4 339	5 098	5 857	6 817
劳动力人数	1.19	1.26	1.31	1.32

［**解**］　第一步，将原始数据做均值化处理。

因为

$$\bar{x}_0 = \frac{1}{4}(8\ 222 + 9\ 077 + 9\ 818 + 10\ 912) = 9\ 507.25$$

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{4}(0.889\ 3 + 0.903\ 7 + 0.915\ 0 + 0.973\ 9) = 0.920\ 5$$

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{4}(1\ 339 + 5\ 098 + 5\ 857 + 6\ 817) = 5\ 527.75$$

$$\bar{x}_3 = \frac{1}{4}(1.19 + 1.26 + 1.31 + 1.32) = 1.27$$

均化值处理后的数列为

$$x_0 = \left(\frac{8\ 222}{9\ 507.25}, \frac{9\ 077}{9\ 507.25}, \frac{9\ 818}{9\ 507.25}, \frac{10\ 912}{9\ 507.25}\right) = (0.864\ 8, 0.954\ 7, 1.032\ 7, 1.147\ 8)$$

$$x_1 = \left(\frac{0.8\ 893}{0.9\ 205}, \frac{0.9\ 037}{0.9\ 205}, \frac{0.9\ 105}{0.9\ 205}, \frac{0.9\ 739}{0.9\ 205}\right) = (0.966\ 1, 0.981\ 8, 0.994\ 1, 1.058\ 0)$$

$$x_2 = \left(\frac{4\ 339}{5\ 527.75}, \frac{5\ 098}{5\ 527.75}, \frac{5\ 857}{5\ 525.75}, \frac{6\ 817}{5\ 525.75}\right) = (0.784\ 9, 0.922\ 3, 1.059\ 6, 1.233\ 2)$$

$$x_3 = \left(\frac{1.19}{1.27}, \frac{1.26}{1.27}, \frac{1.31}{1.27}, \frac{1.32}{1.27}\right) = (0.937\ 0, 0.992\ 1, 1.031\ 5, 1.039\ 4)$$

第二步,求差序列。根据 $\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$,$i = 1,2,3$; $k = 1,2,3,4$,

在 $k = 1$ 时,$i = 1$ 得:$\Delta_{01}(1) = |x_0(1) - x_1(1)| = |0.864\ 8 - 0.966\ 1| = 0.101\ 3$;

在 $k=1$ 时,$i = 2$ 得:$\Delta_{02}(1) = |x_0(1) - x_2(1)| = |0.864\ 8 - 0.781\ 9| = 0.079\ 9$;

在 $k=1$ 时,$i = 3$ 得:$\Delta_{03}(1) = |x_0(1) - x_3(1)| = |0.8648 - 0.9370| = 0.072\ 2$。

同理可得其他时刻的绝对差,如表 4-2 所示。

表 4-2 各个时刻的绝对差

K / $\Delta_{0i}(k)$	1	2	3	4
$\Delta_{01}(k)$	0.101 3	0.027	0.038 6	0.089 7
$\Delta_{02}(k)$	0.079 9	0.032 5	0.026 9	0.085 5
$\Delta_{03}(k)$	0.072 2	0.037 4	0.001 2	0.108 4

因此得出差数列:

$$\Delta_{01} = \{\Delta_{01}(1), \Delta_{01}(2), \Delta_{01}(3), \Delta_{01}(4)\} = \{0.101\ 3, 0.027, 0.038\ 6, 0.089\ 7\}$$

$$\Delta_{02} = \{\Delta_{02}(1), \Delta_{02}(2), \Delta_{02}(3), \Delta_{02}(4)\} = \{0.079\ 9, 0.032\ 5, 0.026\ 9, 0.085\ 5\}$$

$$\Delta_{03}=\{\Delta_{03}(1),\Delta_{03}(2),\Delta_{03}(3),\Delta_{03}(4)\}=\{0.0722,0.0374,0.0012,0.1084\}$$

第三步，求两级最大差和最小差。

因为

$$\max_k |x_0(k)-x_1(k)|=\Delta_{01}(1)=0.1013$$

$$\max_k |x_0(k)-x_2(k)|=\Delta_{02}(4)=0.0855$$

$$\max_k |x_0(k)-x_3(k)|=\Delta_{03}(4)=0.1084$$

所以

$$\Delta_{\max}=\max_i \max_k |x_0(k)-x_i(k)|=0.1084$$

同理可得

$$\Delta_{\min}=\min_i \min_k |x_0(k)-x_i(k)|=0.0012$$

实际上 $\Delta_{\min}=0$，因为数列间交点不在时刻点上，所以计算中应取 $\Delta_{\min}=0$ 为宜。

第四步，计算关联系数。

根据 $\varepsilon_{0i}(k)=\dfrac{\rho\Delta_{\max}+\Delta_{\min}}{\Delta_{0i}(k)+\rho\Delta_{\max}}$，取 $\rho=0.5$，有

$$\varepsilon_{0i}(k)=\frac{0.5\times 0.1084}{\Delta_{0i}(k)+0.5\times 0.1084}=\frac{0.0542}{\Delta_{0i}(k)+0.0542}$$

故 $k=1$ 时，得

$$\varepsilon_{01}(1)=\frac{0.0542}{\Delta_{01}(1)+0.0542}=\frac{0.0542}{0.1013+0.0542}=0.3485$$

$$\varepsilon_{02}(1)=\frac{0.0542}{\Delta_{02}(1)+0.0542}=\frac{0.0542}{0.0799+0.0542}=0.4042$$

$$\varepsilon_{03}(1)=\frac{0.0542}{\Delta_{03}(1)+0.0542}=\frac{0.0542}{0.0722+0.0542}=0.4288$$

同理可得其他时刻的关联系数：

$$\varepsilon_{01}(2)=0.6672,\quad \varepsilon_{01}(3)=0.5838,\quad \varepsilon_{01}(4)=0.3766$$

$$\varepsilon_{02}(2)=0.6252,\quad \varepsilon_{02}(3)=0.6685,\quad \varepsilon_{02}(4)=0.388$$

$$\varepsilon_{03}(2)=0.5918,\quad \varepsilon_{03}(3)=0.9785,\quad \varepsilon_{03}(4)=0.3333$$

第五步，计算关联度。

根据

$$\gamma_{0i}=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\varepsilon_{0i}(k)$$

有

$$\begin{aligned}\gamma_{01}&=\frac{1}{4}\sum_{k=1}^{4}\varepsilon_{01}(k)=\frac{1}{4}(\varepsilon_{01}(1)+\varepsilon_{01}(2)+\varepsilon_{01}(3)+\varepsilon_{01}(4))\\&=\frac{1}{4}(0.3485+0.6672+0.5838+0.3766)\\&=0.49402\end{aligned}$$

同理可得

$$\gamma_{02}=\frac{1}{4}(0.4042+0.6252+0.6685+0.388)=0.52148$$

$$\gamma_{03}=\frac{1}{4}(0.4288+0.5918+0.9785+0.3333)=0.58311$$

第六步，排关联序。

由上得

$$0.58311>0.52148>0.49402$$

即

$$\gamma_{03}>\gamma_{02}>\gamma_{01}$$

说明 x_3 与 x_0 的关联度最大，也就是说该镇劳动力人数与工业产值的关系最密切。

附程序：

```
clear,clc;
sj=[8222,9077,9818,10912;0.8893,0.9037,0.9150,0.9739;
4339,5098,5857,6817;1.19,1.26,1.31,1.32];
x=zeros(4,1);
S=zeros(4);
for i=1:4
x(i)=mean(sj(i,:));    % 均值化处理
end
for i=1:4
S(i,:)=sj(i,:)/x(i);    % 归一化处理
```

```
end
dS = zeros(3,4);
for i = 1:3
dS(i,:) = abs(S(1,:) - S(i + 1,:));    % 求差序列
end
dS_max = max(dS(:));    % 求两级最大差
dS_min = min(dS(:));        % 求两级最小差
dS_min = 0; % % % % % % % % %,因为数列间交点不在时刻点上,实际情况 dS_min 为 0
r = 0.5;
eS = zeros(3,4);
for i = 1:3
for j = 1:4
eS(i,j) = r * dS_max/(dS(i,j) + r * dS_max);    % 计算关联系数
end
end
rS = zeros(3,1);
for i = 1:3
rS(i,:) = mean(eS(i,:));      % 计算关联度
end
[mQ,Q] = max(rS)    % 排关联序
```

第三节　灰色综合评价法

灰色系统是按颜色来命名的,因为在控制论中,人们常用颜色的深浅来形容信息的明确程度。用“黑”表示信息未知,用“白”来表示信息完全明确,用“灰”表示部分信息明确、部分信息不明确。灰色系统是贫信息系统,统计方法难以奏效。灰色系统理论能处理贫信息系统,适用于只有少量观测数据的项目。灰色系统理论是我国著名学者邓聚龙教授于 1982 年提出的。他的研究

对象是“部分信息已知，部分信息未知”的“贫信息”不确定性系统，他通过对部分已知信息的生成、开发实现对现实世界的确切描述和认识。换句话说，灰色系统理论主要是利用已知信息来确定系统的未知信息，使系统由“灰”变“白”。其最大的特点是对样本量没有严格的要求，不要求服从任何分布。

从目前来看，灰色系统理论主要研究下列几个方面：灰色因素的关联度分析、灰色建模、灰色预测、灰色决策、灰色系统分析、灰色系统控制、灰色系统优化等。

社会系统、经济系统、农业系统、生态系统等抽象系统包含多种因素，这些因素之间哪些是主要的，哪些是次要的，哪些影响大，哪些影响小，哪些需要发展，哪些需要拟制，都是因素分析的内容。

回归分析虽然是一种较通用的方法，但大都只用于少因素的、线性的，对于多因素的、非线性的则难以处理。灰色理论提出一种新的分析方法及系统的关联度分析方法，这是根据因素之间发展态势的相似或相异程度来衡量因素间关联程度的方法。

由于关联度分析方法是按发展趋势分析，因此对样本量的多少没有要求，也不需要有典型的分布规律，计算量小，即使是上十个变量（序列）的情况也可以手算，不至于出现关联度的量化结果与定性分析不一致的情况。进行关联度分析，首先要找准数据序列，用什么数据才能反映系统的行为特征。当有了系统行为的数据列（即各时刻的数据）后，根据关联度计算公式便可算出关联程度。关联度反映各评价对象对理想（标准）对象的接近次序，以及评价对象的优劣次序，其中灰色关联度最大的评价对象最佳。灰色关联度分析，不仅可以作为优势分析的基础，而且也是进行科学决策的依据。关联度分析方法的最大优点是它对数据量没有太高的要求，即数据多与少都可以分析。关联度分析方法是非统计方法，在系统数据资料较少和条件不满足统计要求的情况下更具有实用性。

灰色理论是应用最广泛的关联度分析方法。关联度分析是分析系统中各元素之间的关联成或相似程度的方法，其基本思想是根据关联度对系统排序。下面介绍基于关联度分析的综合评价模型和步骤。

一、灰色关联度分析

关联度是表征两个事物的关联程度，具体来说，关联度使因素之间关联性大小的量

度，它定量地描述了因素之间相对变化的情况。关联分析是灰色分析、评价和决策的基础。从思路上看，关联分析是属于几何处理范畴的。它是一种相对性的排序分析，基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密，曲线越接近，相应序列之间的关联度就越大，反之就越小。作为一个发展变化的系统，关联度分析事实上是动态过程发展态势的量化分析。

下面介绍几种衡量因素间关联度程度大小的量化方法。

1. 绝对关联度

做关联分析先要指定参考的数据列（母因素时间数列），参考数据列常记为 $\boldsymbol{X}_0$，一般表示为

$$\boldsymbol{X}_0 = \{x_0(1), x_0(2), \cdots, x_0(n)\}$$

关联分析中被比较数列（子因素时间数列）常记为 $\boldsymbol{X}_i$，一般表示为

$$\boldsymbol{X}_i = \{x_i(1), x_i(2), \cdots, x_i(n)\}, \quad i = 1,2,\cdots,m$$

对于一个参考数据列 $\boldsymbol{X}_0$，比较数列为 $\boldsymbol{X}_i$，可用下述关系表示各比较曲线与参考曲线各点的差：

$$\xi_i(k) = \frac{\min\limits_i \min\limits_k \min\left|x_0(k) - x_i(k)\right| + \xi \max\limits_i \max\limits_k \left|x_0(k) - \boldsymbol{x}_i(k)\right|}{\left|x_0(k) - x_i(k)\right| + \xi \max\limits_i \max\limits_k \left|x_0(k) - x_i(k)\right|}$$

式中，$\xi_i(k)$为第 k 时刻比较曲线 x_i 与参考曲线 x_0 的相对差值，这种形式的相对差值称为 x_i 对 x_0 在 k 时刻的关联系数。ξ 为分辨系数，ξ 属于[0,1]，引入它是为了减少极值对计算的影响。在实际使用时，应根据序列间的关联程度选择分辨系数，一般取 $\xi \leqslant 0.5$ 最为恰当。若记

$$\Delta_{\min} = \min\limits_i \min\limits_k \left|x_0(k) - x_i(k)\right| ,$$

$$\Delta_{\max} = \max\limits_i \max\limits_k \left|x_0(k) - x_i(k)\right|$$

则 $\Delta_{\min}$ 与 $\Delta_{\max}$ 分别为各时刻 x_0 与 x_i 的最小绝对差值与最大绝对差值，从而有

$$\xi(k) = \frac{\Delta_{\min} + \Delta_{\max}}{\left|x_0(k) - x_i(k)\right| + \xi \Delta_{\max}}$$

如果计算关联程度的数列量纲不同，要转换为无量纲。无量纲化的方法，常用的有初始化与均值化。初始化是指所有数据均用第一个数据除，然后得到一个新的数列，这个新的数列即是各不同时刻的值相对于第一个时刻的值的百分比。均

值化处理就是用序列平均值除以所有数据，即得到一个占平均值百分比的数列。另外，就是还有我们经常使用的规范化处理。

关联系数只表示各时刻数据间的关联程度，由于关联系数的数很多，信息过于分散，不便于比较，为此有必要将各个时刻的关联度系数集中为一个值，求平均值变时作为这种信息集中处理的一种方法。于是，绝对关联度的一般表达式为

$$r_i = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\xi_i(k)$$

或者说 r_i 是曲线 x_i 对参数曲线 x_0 的绝对关联度。

2. 速率关联度

绝对关联度是反映事物之间关联程度的一种指标，它能指示具有一定样本长度的给定因素之间的关联情况。但它也有明显的缺点，即绝对值关联度受数据中极大值和极小值的影响，一旦数据序列中出现某个极值，关联度就会发生变化。因此，绝对关联度有时不能真正反映数据列之间的关联程度。另外，计算绝对关联度时，需要对原数据做无量化处理，比较烦琐。

速率关联度则是从另外一个角度来定义关联度的。它反映的是两个事物在发展过程中相对变化速率的关联程度。如果两个事物在发展过程中的相对变化速率一致，则认为两者有较好的关联；反之，如果两个事物在发展过程中的相对变化速率很不一致，两者关联程度就较差。

设有母函数 X，如果子函数 X_i 的相对变化速率 $\frac{1}{X_1}\frac{dX_1}{dt}$ 在几何学上子函数 X_2 更接近于 X 的相对变化速率 $\frac{1}{X_2}\frac{dX_2}{dt}$，那么 X_1 与 X 的关联度比 X_2 与 X 的关联度大。把原始数据变换成 $\frac{1}{X}\frac{dX}{dt}$，不但消除了量纲，而且表示事物发展的特征，这是一个信息开发过程，在计算时不用选参考点，也有利于编制计算程序。

这里给出速率关联系数：

$$\xi_i(k) = \frac{1}{1+\left|\frac{x_i(k+1)-x_i(k)}{x_i(k)\Delta t} - \frac{x_0(k+1)-x_0(k)}{x_0(k)\Delta t}\right|}, \quad k=1,2,\cdots,n$$

很明显，当等间隔采样时，$\Delta t=(t+1)-t=1$，从而给出速率关联度的公式定义为

$$R_i=\frac{1}{n-1}\sum_{k=1}^{n}\xi_i(k)$$

或者说 r_i 是曲线 x_i 对参数曲线 x_0 的速率关联度。

从上可知，速率关联度系数反映了每一时刻两事物相对变化速率的一致程度，速率关联度反映了特定时间段内两事物相对变化速率一致程度的平均状况，它反映两事物在区间内相对发展速度一致程度的综合评判。

关联度分析的目的，就是在影响某参数数列 x_0 的诸因素 x_i 中找出主要因素，也就是按对 x_0 的关联程度大小对 x_i 进行排序。

若 x_i 与 x_0、x_j 与 x_0 的关联度分别为 r_i，r_j，则

（1）$r_i>r_j$ 时，称 x_i 优于 x_j；

（2）$r_i<r_j$ 时，称 x_i 劣于 x_j；

（3）$r_i=r_j$ 时，称 x_i 等于 x_j；

（4）$r_i\geqslant r_j$ 时，称 x_i 不劣于 x_j；

（5）$r_i\leqslant r_j$ 时，称 x_i 不优于 x_j。

于是可以把影响母序列 x_0 的因素 x_i 按上述定义的优劣排队，即按各自对 x_0 的影响程度大小排序，从而完成关联分析。

总的来说，灰色关联度分析是系统态势的量化比较分析，其实质就是比较若干数列所构成的曲线列理想（标准）数列所构成的曲线几何形状的接近程度，几何形状越接近，其关联度越大。关联序则反映个评价对象对理想（标准）对象的接近次序，以及评价对象的优劣次序，其中灰色关联度最大的评价对象为最佳。因此，利用灰色关联度可对评价对象的优劣进行分析比较。

二、基于灰色关联度分析的灰色综合评价方法

对事物的综合评价，多数情况是研究多对象的排序问题，即在各个评价对象之间排出优先顺序。

灰色综合评价评判主要是依据以下模型：

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{W}$$

式中，$\boldsymbol{R}=[r_1,r_2,\cdots,r_n]^{\mathrm{T}}$为$m$个评价对象的综合评判结果向量；$\boldsymbol{W}=[w_1,w_2,\cdots,w_n]^{\mathrm{T}}$为$n$个评判指标的权重分配向量，
其中，

$$\sum_{j=1}^{\mathrm{n}} w_j = 1$$

E为各指标的评判对象矩阵：

$$\boldsymbol{E}=\begin{Bmatrix} \xi_1(1) & \xi_1(2) & \cdots & \xi_1(n) \\ \xi_2(1) & \xi_2(2) & \cdots & \xi_2(n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \xi_m(1) & \xi_m(2) & \cdots & \xi_m(n) \end{Bmatrix}$$

$\xi_i(k)$为第i种方案的第k个指标与第k个最有指标的关联系数。

根据R的数值，进行排序。

1. 确定最优指标集($\boldsymbol{F}^*$)

设$F^*=[j_1{}^*,j_2{}^*,\cdots,j_n{}^*]$，式中，$j_{k+}^*(k=1,2,\cdots,n)$为第$K$个指标的最优值，此最优值可以是诸方案中最优值(若某一指标取大值为好，则取该指标在各个方案中的最大值；若取小值为好，则取各个方案中的最小值)，也可以是评价者公认的最优值。不过在定最优值时，既要考虑到先进性，又要考虑到可行性。若最优指标选的过高，则不现实，不能实现，评价的结果也就不可能正确。

选定最优指标集后，可构造矩阵$\boldsymbol{D}$：

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix} j_1^* & j_2^* & \cdots & j_n^* \\ j_1^1 & j_2^1 & \cdots & j_n^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ j_1^m & j_2^m & \cdots & j_n^m \end{bmatrix}$$

式中，j_k^i为第i个方案中第k个目标的原始数值。

2. 指标值的规范化处理

由于评判指标间通常有不同的量纲和数量级，故不能直接进行比较，为了保证

结果的可靠性,需要对原始指标值进行规范处理。

设第 k 个指标的变化区间为$[j_{k1}^i, j_{k2}^i]$,j_k^i为第 k 个指标在所有方案中的最小值,j_{k2}^i为第 k 个指标在所有方案中的最大值,可用下式将上式中原始数值变换成无量纲值 C_k^i属于(0,1):

$$C_k^i = \frac{j_k^i - j_{k1}}{j_{k2} - j_k^i}, \quad i = 1,2,\cdots,; \quad k = 1,2,\cdots,n$$

这样 $\boldsymbol{D}-\boldsymbol{C}$ 矩阵

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} C_1^* & C_2^* & \cdots & C_n^* \\ C_1^1 & C_2^1 & \cdots & C_n^1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_1^m & C_2^m & \cdots & C_1^m \end{bmatrix}$$

3. 计算综合评判结果

根据灰色系统理论,将$\{C^*\} = [C_1{}^*, C_2{}^*, \cdots, C_n{}^*]$作为参考数列,将$\{C\} = [C_1{}^i. C_2{}^i, \cdots, C_n{}^i]$作为被比较数列,则用关联分析法分别求得第 i 个方案第 k 个指标与第 k 个最优指标的关联系数 $\xi_i(k)$,即

$$\xi_i(k) = \frac{\min\limits_i \min\limits_k |C_k{}^* - C_k{}^i| + \rho \max\limits_i \max\limits_k |C_k{}^* - C_k{}^i|}{|C_k{}^* - C_k{}^i| + \rho \max\limits_i \max\limits_k |C_k{}^* - C_k{}^i|}$$

式中,ρ 属于$[0,1]$,一般取 $\rho=0.5$。

由 $\xi_i(k)$,即 $\boldsymbol{E}$,这样综合评判结果为 $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{W}$,即

$$r_i = \sum_{k=1}^{n} \boldsymbol{W}(k) \times \xi_i(k)$$

若关联度 r_i 最大,则说明$\{C^i\}$与最优指标$\{C^*\}$最接近,亦即第 i 个方案优于其他方案,据此可以排出各个方案的优劣次序。

步骤总结:

(1) 确定比较数列(评价对象)和参考数列(评价标准)

设评价对象为 m 个,评价指标为 n 个,则比较数列为

$$X_i = \{X_i(k) | k=1,2,\cdots,n\}, (i=1,2,\cdots,m)$$

参考数列为

$$X_0=\{X_0(k)|k=1,2,\cdots,n\}$$

（2）确定各指标值对应的权重

可利用层次分析法等确定各指标对应的权重为

$$\boldsymbol{W}=\{X_k|k=1,2,\cdots,n\}$$

式中，W_k 表示第 k 个评价指标对应的权重。

（3）计算灰色关联度系数 $\xi_i(k)$

$$\xi_i(k)=\frac{\min\limits_i\min\limits_k|x_0(k)-x_i(k)|+\xi\max\limits_i\max\limits_k|x_0(k)-x_i(k)|}{|x_0(k)-x_i(k)|+\xi\max\limits_i\max\limits_k|x_0(k)-x_i(k)|}$$

式中，$\xi_i(k)$表示比较数列 X_i 与参考数列 X_0 在第 k 个评价指标上的相对差值。

（4）计算灰色加权关联度，建立灰色关联度。灰色加权关联度的计算公式为

$$r_i=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}W_k\xi_i(k)$$

式中，r_i 表示第 i 个评价对象对理想对象的灰色加权关联度。

（5）评价分析。根据灰色加权关联度的大小，对各评价对象进行排序，即建立评价对象的关联序，关联度越大，其评价结果越好。

案例3　基于灰色层次分析法的临近空间系统效能评价

一、引言

临近空间（near space）是美军对海拔 20～100km 空间范围的一个通用性称谓，目前没有国际公认的确切定义。美军也有人称之为“横断区”。我国学术界说的“亚太空”、“超高空”、“高高空”、“近太空”也是指这一区域。它包括大气平流层、中间层和部分电离层，介于传统的空天之间，处于空天一体化作战的重要战略领

域。开展临近空间系统效能评价研究，明确临近空间发展方向，对构筑临近空间应用系统具有重要意义。

二、临近空间系统效能评价建模思路

临近空间系统属于多层次和多目标综合评价问题。目前广泛应用于风险评价中的层次分析法在建立判断矩阵时，只是将各单个指标值进行比较，然而，复杂系统中各因素指标之间并不是互相独立的，而是存在一种不确定的关系，本质上，就是一种灰色关系。灰色系统理论通过对部分已知信息的生成、开发，以不确定系统为研究对象，提取有价值的信息，对系统运行状态做出正确判断。而层次分析法为各评价指标确定权重提供了有效的解决方法，弥补了灰色理论的不足。因此，可以将灰色理论与层次分析法相结合，进行临近空间系统的效能分析。临近空间效能评价建模基本思路如图 4-1 所示。

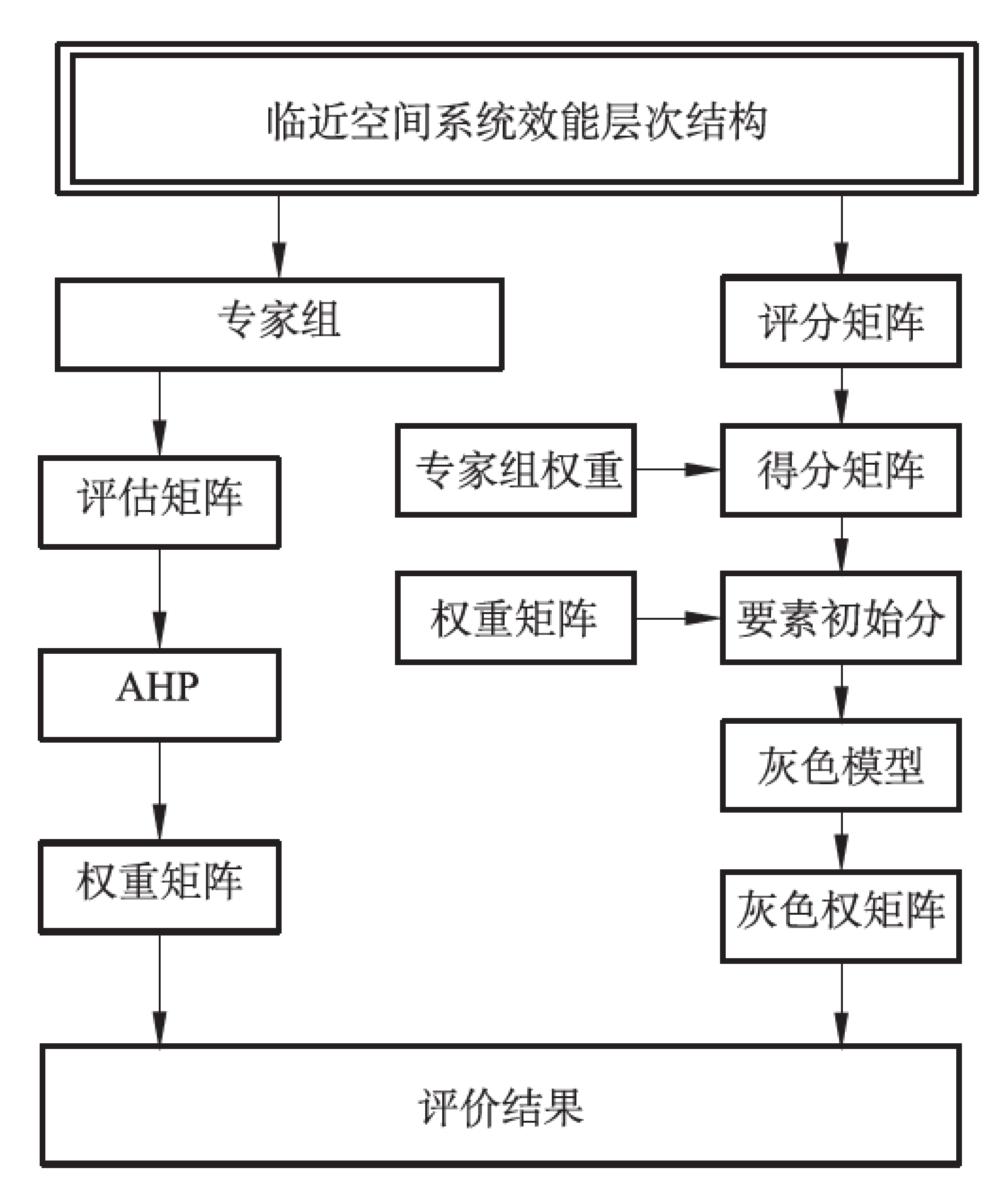


图 4-1　临近空间效能评价建模基本思路

三、临近空间系统效能评价模型

1. 建立评价对象的递阶层次结构

使用层次分析的思想，在深入调查研究的基础上，对评价目标进行逐层分解，使同层次的元素为并列关系，相邻上下层之间为递推隶属关系，形成递阶层次结构。

根据临近空间系统效能评价的特点，采用 ADC 模型，对效能评价体系进行顶层设计，将系统开始执行的状态由“可用性 A”描述，执行任务过程中状态由“可信性 D”描述，完成给定任务的程度由“能力 C”描述，并根据其能力分布和影响因素，划定能力次级评价指标和基层指标的权重如图 4-2 所示；而后建立能力 C 及其构成指标的评价模型，并由基层指标的权重确定次级指标的权重，结合能力评价模型决定能力指标 C，最终得出系统效能。

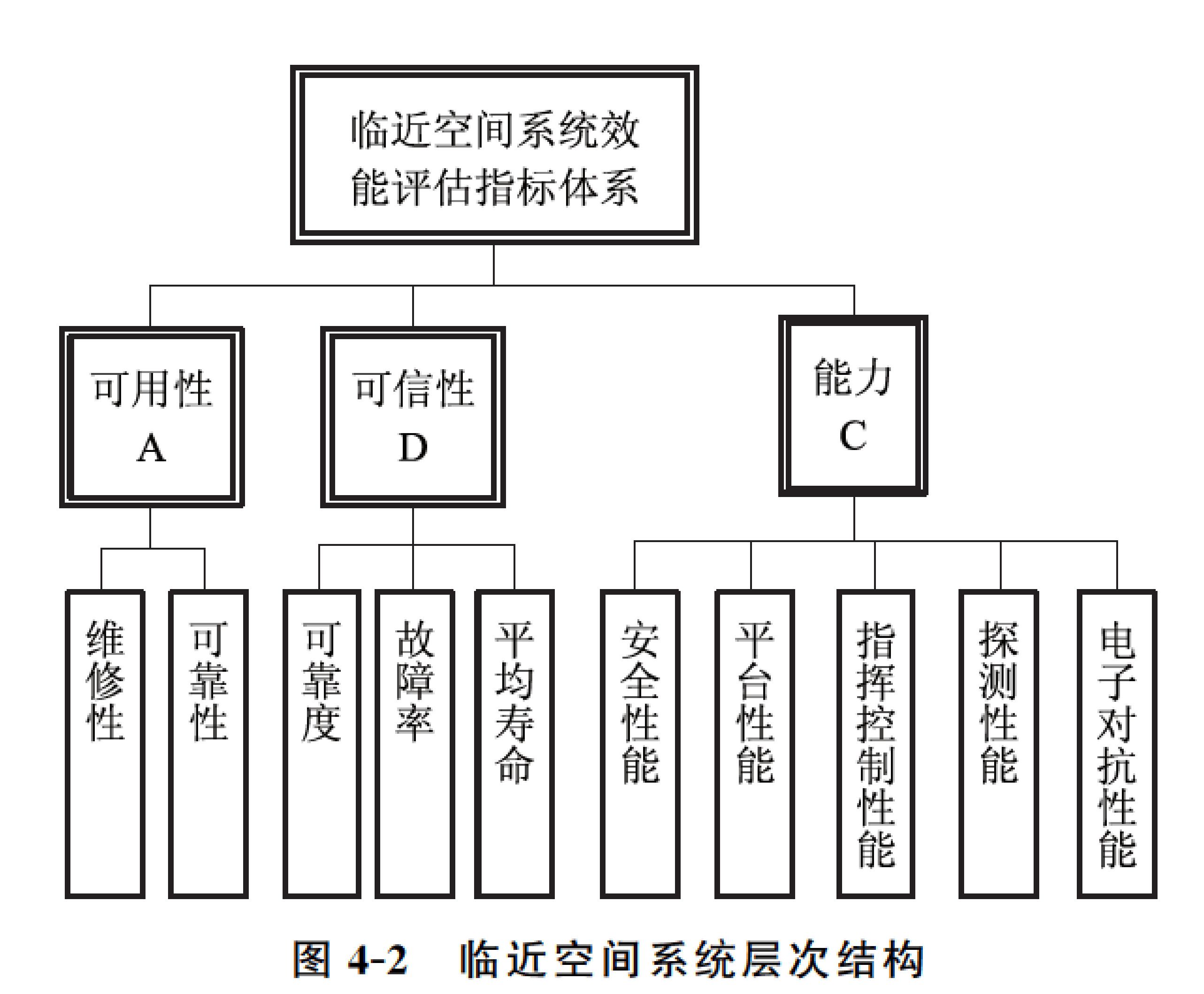


图 4-2 临近空间系统层次结构

2. 确定各层次的权重

在该评价指标体系中，考虑到各个指标对上一层目标和总目标的贡献不同，即

有不同的权重。确定指标的权重,可采用层次分析法,其基本方法是:对同一层次的各因素两两间的重要性,专家依据对客观现实的判断进行打分,设 $\mathbf{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_n)^{\mathrm{T}}$ 为 U 中各元素权重的集合,且满足

$$\sum_{i=1}^{n} w_i = 1, \quad w_i \geqslant 0, \quad i = 1,2,\cdots,n$$

根据简易表格法,由专家或评价组对上下层关系进行定性填表,用精确法或和法计算相邻层次,以及下层对于上层元素的权重。

3. 确定评价指标的值

由于在三级指标 V_{ij} 中,有许多定性和尚未形成统一评价标准的指标难以得到精确的结果,因此采用专家打分的形式得到指标的评分,如将指标划分为"好"、"较好"、"一般"、"差"四个等级,规定 10～9 分为"好",9～7 分为"较好",7～5 分为"一般",5 分为"差",以此标准组织专家对指标 V_{ij} 打分。

为了简化模型,对能够给出明确数值结果的指标依据专家知识将评价指标的原始数据直接转化为得分,由此可得每个专家对所有三级指标 V_{ij} 的值。

4. 确定样本矩阵

评价样本矩阵是由评价指标组成的矩阵。设专家 t 对临近空间效能体系的三级指标 V_{ij} 给出评分为 $d_{ij}{}^{t}$ ($d_{ij}{}^{t} \in [0,10]$),则可构造评价样本矩阵:

$$\boldsymbol{D}_{ij}^{t} = \begin{pmatrix} d_{11}^{t} & d_{12}^{t} & \cdots & d_{1i}^{t} \\ d_{21}^{t} & d_{22}^{t} & \cdots & d_{2i}^{t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{j1}^{t} & d_{j2}^{t} & \cdots & d_{ji}^{t} \end{pmatrix}$$

其中,矩阵行向量为所有专家对三级指标 V_{ij} 的评分值,列向量为专家 t 对所有三级指标的评分值。

5. 确定评价灰类

假设临近空间效能的评价体系可以用"好"、"较好"、"一般"、"差"等若干个类别进行评价,而这种评价类别的划分是灰色的,因此称为评价灰类。按评价灰类分

别生成对应的白化函数，并对不同的评价指标在白化函数中对应的白化值进行归纳整理，计算待评价性能属于每种评价灰类的权，从而可以评价临近空间效能的优劣；结合全面指标 V_{ij} 的评分等级标准，本案例将临近空间效能分为“优秀”、“良好”、“合格”、“不合格”四个灰类：第一灰类“优秀”$(e=1)\otimes_1\in[6,9,\infty]$，第二灰类“良好”$(e=2)\otimes_2\in[0,8,10]$，第三灰类“合格”$(e=3)\otimes_3\in[0,6,10]$，对应的白化函数分别为

$$f_1(d_{ij})=\begin{cases}(d_{ij}-6)/3 & d_{ij}\in[6,9]\\ 1 & d_{ij}\in[9,\infty]\\ 0 & d_{ij}\in[-\infty,6]\end{cases}$$

$$f_2(d_{ij})=\begin{cases}d_{ij}/8 & d_{ij}\in[0,8]\\ (10-d_{ij})/2 & d_{ij}\in[8,10]\\ 0 & d_{ij}\notin[0,10]\end{cases}$$

$$f_3(d_{ij})=\begin{cases}1 & d_{ij}\in[0,6]\\ (10-d_{ij})/4 & d_{ij}\in[6,10]\\ 0 & d_{ij}\notin[0,6]\end{cases}$$

指标 V_{ij} 属于第 e 个评价灰类得的灰色评价系数为 c_{ije}，总灰色评价数为 c_{ij}，则有

$$c_{ije}=\sum_{t=1}^{p}f_e(d_{ijt}),\quad c_{ije}=\sum_{e=1}^{4}c_{ije},\quad r_{ije}=c_{ije}/c_{ij}$$

从而有灰色评价权向量 $\boldsymbol{r}_{ij}$ 为

$$\boldsymbol{r}_{ij}=(r_{ij1},r_{ij2},r_{ij3},r_{ij4})$$

二级指标 U_i 隶属的 m 个指标 v_{ij} 对各灰类的灰色评价权矩阵为

$$\boldsymbol{R}_i=[r_{ije}]_{m\times4}$$

6. 综合评价模型

由前面得到三级指标权重集 $\boldsymbol{a}_i$ 和灰色评价权矩阵 $\boldsymbol{R}_i$，可对三级指标 V_{ij} 进行综合评价，得到的结果为 $\boldsymbol{B}_i$：

$$\boldsymbol{B}_i=\boldsymbol{a}_i\times\boldsymbol{R}_i=(b_{ij1},b_{ij2},b_{ij3},b_{ij4}),\quad i=1,2,3,4;\quad j=1,2,\cdots,m$$

再结合二级指标的权重排序 $\boldsymbol{A}$，对二级指标作综合评价，得到结果

$$\boldsymbol{w} = \boldsymbol{A} \times \boldsymbol{B}_i = [w_1, w_2, w_3]$$

将各评价灰类按等级赋值，即第一灰类“优”取 9；第二灰类“较好”取 7；第三灰类“差”取 3，得到各评价灰类等级赋值向量 $\boldsymbol{C}=(9,7,3)$，则临近空间系统效能的综合评价值为

$$W = w \times \boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}$$

求得 W 越大，临近空间系统的效能越高。

四、算例分析

根据前文所建立的效能评价模型，组织专家对临近空间系统进行打分。

（1）首先根据具体情况，采用层次分析法确定权重

二级指标层和三级指标层的权重分别为

$$\boldsymbol{A} = (0.66, 0.21, 0.13)$$

$$\boldsymbol{a}_1 = (0.4, 0.6)$$

$$\boldsymbol{a}_2 = (0.32, 0.43, 0.25)$$

$$\boldsymbol{a}_3 = (0.35, 0.25, 0.17, 0.13, 0.1)$$

（2）组织专家对各指标进行打分

得到评价样本矩阵：

$$\boldsymbol{D}_1 = \begin{bmatrix} 7.5 & 8 \\ 8 & 8 \\ 8 & 7.5 \end{bmatrix}, \boldsymbol{D}_2 = \begin{bmatrix} 8 & 7.5 & 8 \\ 7.5 & 8.5 & 7 \\ 8.5 & 8 & 6.5 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{D}_3 = \begin{bmatrix} 6 & 7 & 8.5 & 8 & 8.5 \\ 8.5 & 8 & 6.5 & 6 & 7.5 \\ 6.5 & 7 & 8 & 8 & 8 \end{bmatrix}$$

（3）计算灰色评价系数

对指标 V_{11} 的第 e 个灰类的灰色评价体系为

$$c_{111} = f_1(7.5) + f_1(8) = 1.1667$$

$$c_{112} = f_2(8) + f_2(8) = 2$$

$$c_{113} = f_3(8) + f_3(7.5) = 1.125$$

则 V_{11} 总的灰色评价数为

$$c_{11}=c_{111}+c_{112}+c_{113}=4.2917$$

V_{11} 对于各灰类的灰色评价权向量为

$$\boldsymbol{r}_{11}=(0.2718,0.466,0.2621)$$

同理可求得

$\boldsymbol{r}_{12}=(0.3248,0.1326,0.5426)$， $\boldsymbol{r}_{21}=(0.3143,0.4286,0.2517)$

$\boldsymbol{r}_{22}=(0.1143,0.3806,0.5051)$， $\boldsymbol{r}_{23}=(0.4373,0.3216,0.2411)$

$\boldsymbol{r}_{31}=(0.2443,0.2216,0.5341)$， $\boldsymbol{r}_{32}=(0.2713,0.4156,0.3131)$

$\boldsymbol{r}_{33}=(0.7713,0.1156,0.1131)$， $\boldsymbol{r}_{34}=(0.4363,0.1476,0.4161)$

$\boldsymbol{r}_{35}=(0.5173,0.2446,0.2381)$

由权向量组成的评价矩阵为

$$\boldsymbol{R}_1=\begin{bmatrix}0.2718 & 0.466 & 0.2621\\ 0.3248 & 0.1326 & 0.5426\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_2=\begin{bmatrix}0.3143 & 0.4286 & 0.2517\\ 0.1143 & 0.3806 & 0.5051\\ 0.4373 & 0.3216 & 0.2411\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_3=\begin{bmatrix}0.2443 & 0.2216 & 0.5341\\ 0.2713 & 0.4156 & 0.3131\\ 0.7713 & 0.1156 & 0.1131\\ 0.4363 & 0.1476 & 0.4161\\ 0.5173 & 0.2446 & 0.2381\end{bmatrix}$$

（4）计算三级指标的综合评价

$$\boldsymbol{B}_1=\boldsymbol{a}_1\times\boldsymbol{R}_1=(0.3036,0.266,0.4304)$$

$$\boldsymbol{B}_2=\boldsymbol{a}_2\times\boldsymbol{R}_2=(2.591,0.3812,0.3580)$$

$$\boldsymbol{B}_3\boldsymbol{a}_3\times\boldsymbol{R}_3=(0.3929,0.2448,0.3623)$$

（5）对二级指标综合评价

$$\boldsymbol{w}=\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B}=(0.3059,0.2874,0.4064)$$

式中，矩阵 $\boldsymbol{B}$ 为以 $\boldsymbol{B}_i$ 为行向量构成的矩阵。

（6）计算临近空间系统的综合效能评价

$$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{w} \times \boldsymbol{C}^{\mathrm{T}} = 5.98$$

通过以上分析，可见：如果能够达到本案例专家打分的水平，则该临近空间系统效能较好。

五、结束语

针对临近空间系统特点，本案例结合灰色理论与层次分析法，对临近空间系统进行了效能评价建模。所建立模型能够最大程度地利用所有数据，避免信息丢失，而且能够将定性指标转化为定量指标，这样有利于合理、公正地评价被评价的对象，可以进行单指标的排序，也可以综合评价，使用方法简便。



层次分析法认为上层指标对下层指标存在着支配关系，而同级指标之间是彼此独立的。而实际问题中，各层之间的指标往往是相互依存的，网络层次分析法正是适应这种需要而产生的一种新方法。

网络层次分析法（analysis network process，ANP）是由 T. L. Satty 教授于1996 年提出的一种决策科学方法，它是对层次分析法的扩展，主要针对的是决策问题的结构具有依赖性和反馈性的情况。

第一节　网络层次分析法的基本原理

一、网络层次分析法结构分析

网络层次分析法首先将系统元素分为控制因素层和网络层两个部分。

第一部分为控制因素层，包括问题目标及决策准则，所有的决策准则均被认为是相互独立的，且只受目标元素支配；控制因素中可以没有决策准则，但至少有一

个目标。控制层中每个准则的权重均可用层次分析法得到。

第二部分为网络层，它是由所有受控制层支配的元素所组成的，其内部是互相影响的网络结构，如图 5-1 所示。

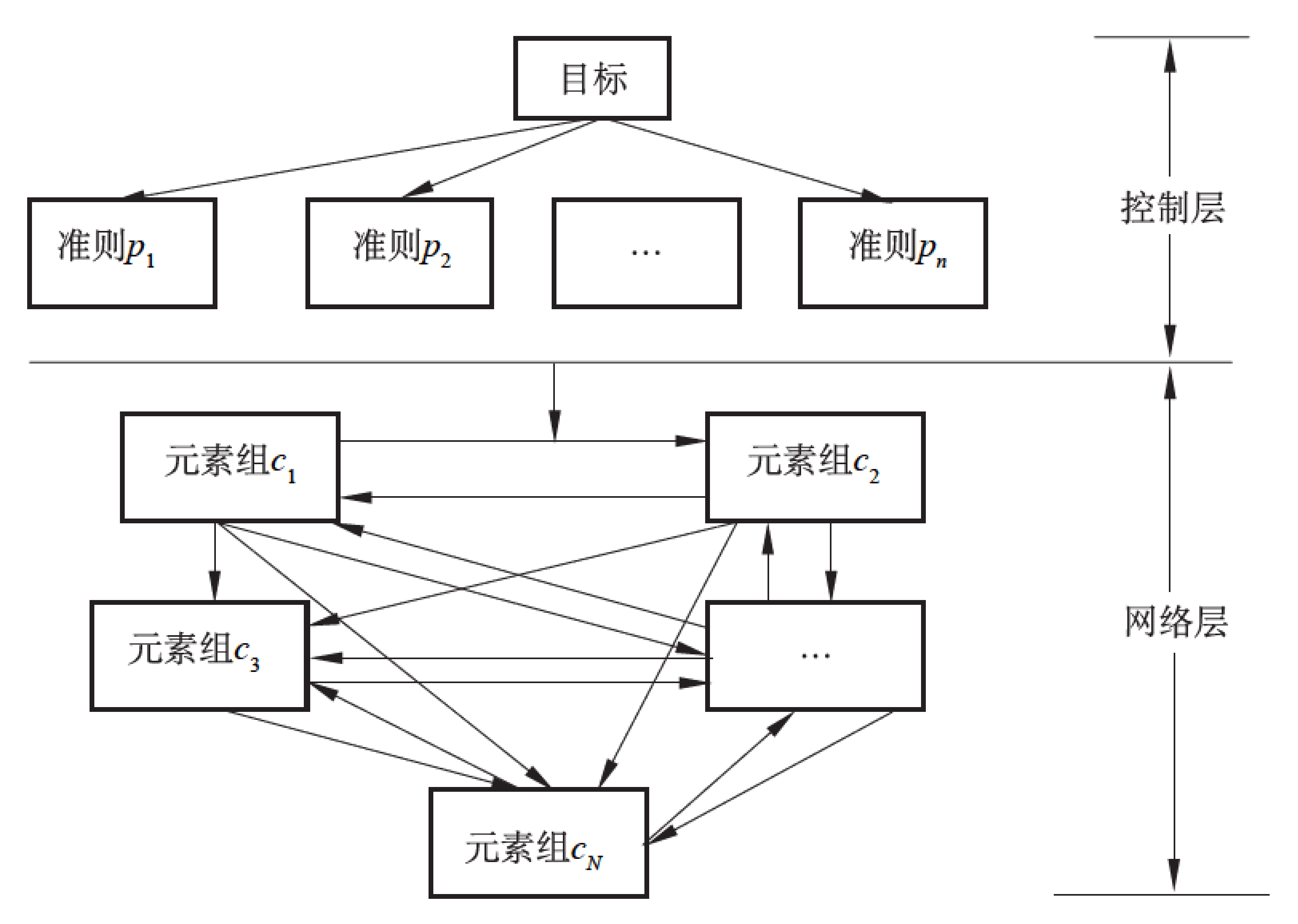


图 5-1　典型的网络层次分析法结构

构造网络层次，要分析归类确定每一元素集，分析其网络结构和相互影响关系。分析元素之间的关系可以采用以下三种方法进行：

（1）内部独立的递阶层次结构，即层次之间相互独立；

（2）内部独立，元素之间存在循环的网络层次结构；

（3）内部依存，即元素内部存在循环的网络层次结构。

二、优势度

在网络层次分析法中用到的优势度有两种：直接优势度和间接优势度。

1. 直接优势度

直接优势度是指给定一个准则，两元素对于该准则的重要程度进行比较。这

种方法比较适合于元素间相互独立的情形。

2. 间接优势度

间接优势度是指给出一个准则，两个元素在准则下对第三个元素的影响程度进行比较。例如，要比较两个运动员在团体比赛中的作用，看他们对别的国家或者协会的运动员的胜负比较而间接得到。这种情形比较适用于元素间相互依存的情形。

三、网络层次分析法的超矩阵与加权矩阵

设网络层次分析法的控制层中有准则 $p_1, p_2, \cdots, p_n$，即相对目标的准则。网络层中有元素组 $\boldsymbol{C}_1, \boldsymbol{C}_2, \cdots, \boldsymbol{C}_N$，其中，$\boldsymbol{C}_i$ 有元素 $e_{i1}, e_{i2}, \cdots, e_{in_i}$，$\boldsymbol{C}_j$ 有元素 $e_{j1}, e_{j2}, \cdots, e_{jn_j}$，元素集 $\boldsymbol{C}_j$ 中元素 e_{jl} 的影响通过两两比较方式进行。

在准则 p_s 下，有

e_{jl}	e_{i1} e_{i2} $\cdots$ e_{in_i}	归一化特征向量
e_{i1}		$w_{i1}^{(jl)}$
e_{i2}		$w_{i2}^{(jl)}$
$\vdots$		$\vdots$
e_{in_i}		$w_{in_i}^{(jl)}$

由特征根法及排序向量 $(w_{i1}^{(j1)}, w_{i1}^{(j2)}, \cdots, w_{in_i}^{(jn_j)})^T$ 得到 $\boldsymbol{w}_{ij}$，表示为

$$\boldsymbol{w}_{ij} = \begin{bmatrix} w_{i1}^{(j1)} & w_{i1}^{(j2)} & \cdots & w_{i1}^{(jn_j)} \\ w_{i2}^{(j1)} & w_{i2}^{(j2)} & \cdots & w_{i2}^{(jn_j)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{in_i}^{(j1)} & w_{in_i}^{(j2)} & \cdots & w_{in_i}^{(jn_j)} \end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{w}_{ij}$ 的列向量就是 $\boldsymbol{C}_i$ 中元素 $e_{i1}, e_{i2}, \cdots, e_{in_i}$，对 $\boldsymbol{C}_j$ 中元素的影响程度排列向量。若 $\boldsymbol{C}_i$ 中元素不受 $\boldsymbol{C}_j$ 中元素的影响，则 $\boldsymbol{w}_{ij}=0$，最终可以获得在准则 p_s 下的超矩阵：

$$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{N1} & w_{N2} & \cdots & w_{NN} \end{bmatrix}$$

以上矩阵是非负矩阵，然而 $\boldsymbol{W}$ 不是归一化的，$\boldsymbol{W}$ 的超矩阵的子块 $\boldsymbol{w}_{ij}$ 是归一化的，则在准则 p_s 下，对 p_s 下各组元素对准则 $C_1,C_2,\cdots,C_N$ 的重要性进行比较。

在准则 p_s 下，有

C_j	C_1 C_2 $\cdots$ C_N	归一化特征向量
C_1		a_{1j}
C_2		a_{2j}
$\vdots$		$\vdots$
C_N		a_{Nj}

与 C_j 无关的元素组对应的排序向量分量为零，由此得到加权矩阵：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{N1} & A_{N2} & \cdots & A_{NN} \end{bmatrix}$$

令

$$\overline{\boldsymbol{w}}_{ij}=a_{ij}w_{ij}$$

即对超矩阵 $\boldsymbol{W}$ 的元素进行加权，得到

$$\overline{\boldsymbol{W}}=\begin{bmatrix} \overline{w}_{11} & \overline{w}_{12} & \cdots & \overline{w}_{1N} \\ \overline{w}_{21} & \overline{w}_{22} & & \overline{w}_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \overline{w}_{N1} & \overline{w}_{N2} & \cdots & \overline{w}_{NN} \end{bmatrix}$$

$\overline{\boldsymbol{W}}$ 即为加权超矩阵，各列的元素之和为 1，称为列随机矩阵。

四、极限相对排序向量

设（加权）超矩阵 $\boldsymbol{W}$ 的元素为 $\boldsymbol{W}_{ij}$，则 $\boldsymbol{W}_{ij}$ 的大小反映了元素 $\boldsymbol{C}_i$ 对元素 $\boldsymbol{C}_j$ 的一

步优势度，元素 $\boldsymbol{C}_i$ 对元素 $\boldsymbol{C}_j$ 的优势度还可以用

$$\sum_{i=1}^{N}\boldsymbol{W}_{ik}\boldsymbol{W}_{kj}$$

得到，称为二步优势度，它是 $\boldsymbol{W}^2$ 的元素。$\boldsymbol{W}^2$ 仍然是列归一化的。

当

$$\boldsymbol{W}^{\infty} = \lim_{n\to\infty}\boldsymbol{W}^n$$

存在时，$\boldsymbol{W}^{\infty}$ 的第 j 列就是 p_s 下网络层中各元素对于元素 $\boldsymbol{C}_j$ 的极限相对排序量。

第二节　网络层次分析法的基本原理

网络层次分析法的应用一般分为以下三个步骤：

Step1，分析问题。将所讨论的决策问题进行分析，形成元素和元素集，然后分析判断元素层次内部独立性，内部依存和反馈性，以及哪些是准则，哪些是元素。

Step2，构造网络层次分析法的典型结构。网络层次分析法采用的是网状结构，这种结构比较灵活，既可以是纯粹的元素集组成的网状结构，也可以是递阶层次结构与网状结构的结合体，甚至可以是递阶层次结构。

网络层次分析法采用的典型结构由控制层和网络层两部分组成。相应地构造网络层次分析法所需要的典型结构也由两部分组成。

第一部分是要构造控制层。控制层是网络层次分析法采用的递阶层次结构，设定决策目标、决策准则，每个准则可以有子准则。控制层若有两个以上准则，则这些准则对上隶属于目标，对下分别控制着一个网络结构。若控制层中只有一个准则，这个准则实际上即为目标，此时网络层次分析法采用的只有网络层。

第二部分是要构造网络层。要分析归类确定每一个元素集，分析其网络结构和相互影响关系。

Step3，构造网络层次分析法的超矩阵计算权重。先进行各相关组的判断矩

阵的两两比较，并计算其权重，对组内和组与组之间的相关元素逐个进行两两比较，计算每个判断矩阵的相对权重，按顺序构造出初始矩阵，计算流程如图 5-2 所示。

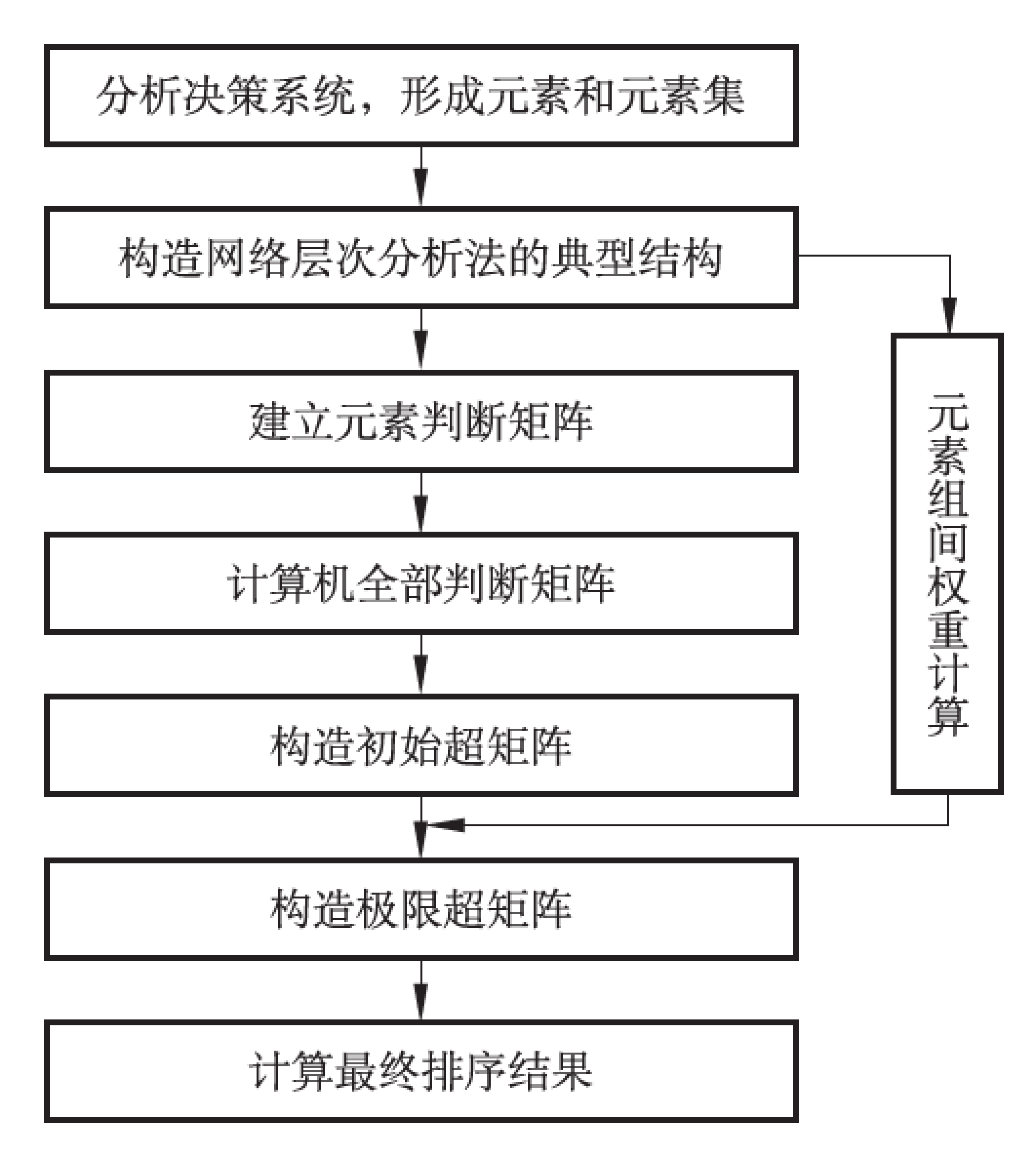


图 5-2　网络层次分析法的计算流程

案例 4　网络层次分析法在目标选择中的应用

一、引言

随着越来越多的高新技术武器装备被投入战场，战争节奏加快，战场环境变得更加复杂，以往战争中那种火力覆盖、无差别攻击方式费时费钱，已无法适应现代战争，取而代之的是按照“高能、合理、够用”的原则精确打击关键目标的攻击方式。由于打击目标的多样性，指挥员在对敌打击之前首先要根据作战意图对目标打击

的顺序进行合理有效的安排，选取打击效果较佳且打击成功可能性较高的目标。目标打击的排序合理与否，直接关系到作战意图能否达成，是取得战场主动权的重要保障，也是控制战争强度、规模和进程的有效手段。

美军十分重视目标选择理论发展。“冷战”时期，在当时美、苏两个超级大国准备全面核大战的背景下，美军将空袭目标按照核力量、常规军事力量、军政领导中心、经济目标排序；到了“冷战”后期，随着苏联国力衰弱，美军的战略发生了重大转变，由全面打核战争转向准备一场高技术条件下的常规战争，因此，1982 年兰德公司提出了《现代战争中经济目标的选择》报告，预言随着高技术兵器的发展现行的目标选择方法将发生变化；1988 年，John A. Warden 提出，在具有高技术空中优势的情况下打击目标应首先选择敌人脆弱的重心——统帅指挥机构和支撑战争的经济目标，突出这两点最有可能取得决定性效果并迅速结束战争，在此思想基础上，他提出了著名的“五环”目标选择理论。按照这一理论，Warden 主持了 1991 年海湾战争中“沙漠风暴”进攻性空中战役计划的制订。2002 年，美军首次颁布 JP3-60《目标的选择与打击联合条令》，该条令在“五环重心”理论的基础上又有了进一步发展：一是在目标的排序和打击程序上更加灵活，把时间敏感目标放在了需要立即做出反应的优先地位；二是确立了“基于效果”目标选择和打击原则，指出“目标选择与打击的艺术要求以最小的风险、最少的时间和最少的资源，实现所期望的效果”。2013 年 1 月版的 JP3-60 中美军仍坚持“基于效果”作为目标选择的主要准则，突出打击目标选择排序的优化，以取得理想效果。不过在当前美军内部正在对“基于效果作战”理论进行一些反思，认为其违反了战争的基本规律，尤其是不能有效指导美军当前的军事行动。那么，美军下一步的目标选择思想到底是怎样的？我们还需要进一步跟踪观察、分析。

二、目标选择的关键因素分析

我们认为对打击目标的分析需要考虑四方面的问题：一是被打击目标的价值，即打击敌人的要害；二是打击目标的风险，即打击该目标的难易程度；三是目标打击的时效性，即打击目标的紧迫性；四是打击目标的成本，即打击这个目标我们该选用哪种弹药，配属哪些保障力量。

1. 目标价值

目标价值,即战场打击目标价值,是衡量己方成功打击敌人之后受益的一个指标。其影响因素有诸多方面,如目标的威胁度、目标对敌战场网络的影响力、目标的精神意义、打击目标的附带杀伤以及目标的不可修复性。

目标的威胁度表现了目标存在对己方及己方作战行动的威胁程度。它具体表现为目标的攻击意图和目标的攻击力。目标攻击意图越高,攻击力越强,对己方的威胁就越大,但其一旦被摧毁,己方就更加安全。

而要成功破击敌方的作战体系,使其系统"混沌"化,还要考虑目标在敌战场网络中的影响力。而要判断目标在敌战场网络中的影响力,首先必须了解和掌握敌战场网络的运行流程,清楚每个目标在战场网络运行过程中所担负的任务。同等条件下,目标被摧毁后对敌作战系统整体功能的影响越大,它的价值就越高。

"目标"不仅包含有生力量及各类工事障碍等有形的物理目标,还涵盖瓦解敌军斗志、实施战略威慑等无形的潜在目标。为达到震慑敌人、摧毁敌心理防线的目的,通常可以选择打击敌人的重要军事设施、政治设施、经济设施,如敌方的军队指挥中心、政府大楼、地标建筑等。

一旦目标遭到打击,很可能会导致整个作战系统无法正常运行甚至处于瘫痪状态,而在实战中,这样的目标在作战系统中往往不是独一无二的。那么在进一步衡量目标价值时,目标从受损状态恢复为正常状态所需的代价和时间是其参考的重要依据。目标功能丧失的时间越长,对战局的发展态势越有利。

2. 打击目标的风险

打击敌人不仅要挑重要的打,还要拣软柿子捏,因此还需要考虑打击目标的风险。衡量打击目标的风险的因素有以下三方面。

(1) 目标的防护能力。是指目标遭受不同方向的弹药攻击时,所能承受的弹药当量值的大小。影响目标防护能力的主要是目标防护体的材质、结构,如钢筋混凝土结构的永久工事比土木结构的工事抗打击能力强得多。所以在战前策划时,需要对目标的防护能力进行细致的了解,以防一拳打到铁板上。

(2) 目标的防御能力。由于重要价值目标对战场局势的影响巨大,各方都会

想尽办法加强防御，增加对手打击的难度，甚至压制对方，使其无法组织有效进攻。因此，目标的防御力量强弱是战场指挥员必须考虑的一个重要因素。如果这些目标的防御力量很强，己方打击就非常困难，以至于无法对目标进行有效打击，就必须修改打击方案。

（3）目标信息可靠性。是反映目标信息准确性的一种指标。它需要从两方面思考，一是目标是否存在；二是目标的位置是否准确。后者又可以分为目标的机动性和侦察的时效性。目标信息若不可靠，打击风险也就越大。

3. 目标打击的时效性

随着战争节奏加快，对战双方争分夺秒，所以目标打击的时效性非常重要，特别是对时敏目标的打击。时敏目标是那些对己方部队造成（或即将造成）危害需要立即做出反应的目标，或者是那些非常合算、瞬息即逝的临时目标。因此，在敌使用机动、隐蔽伪装和欺骗技术干扰有效的目标打击行动之前，必须迅速打击这些时敏目标。

4. 打击的成本

目标打击成本是指己方对敌实施打击时所消耗的资源，包括弹药损耗和对保障力量的占用，其中还涉及目标分配问题。

三、目标选择

为达到所追求的打击效果，在作战决策时，目标选择人员须根据指挥员的作战意图和下达的任务，提出解决问题的最优化模型和方法，进行科学计算与综合筹划。对于不同的作战样式、不同的打击对象和范围，选择目标的方法也是不同的，诸如非线性规划方法、集合论方法、矩阵方法、群落型方法、网络型方法和塔型方法。

在联合作战中，目标选择需要考虑尽量多的相关因素以及因素间的相关性，以免在作战过程中出现任务冲突和重复行动；同时保证目标选择的方法足够灵活，以应付不同作战环境中面临的各种情况。在目标选择的关键因素中，既有需要由专

家评价的定性因素，也有战前侦测的定量数据，那在决策中如何才能将它们融合在一起体现出来？我们运用本案介绍的网络层次分析法进行目标选择。

如果只是对打击目标的打击效益进行简单的比较，用第三章介绍的层次分析法建模进行计算是完全够用的。然而通过前述目标选择的关键因素分析，由于问题的复杂性和权衡分析的需要，运用网络层次分析法建立模型显得更加科学合理。

1. 建立打击目标选择的指标体系

选取能源基地 x_1、指挥中心 x_2、雷达站 x_3、电视台 x_4 这四个具有典型意义的目标组成方案集，记为

$$\boldsymbol{X}=(x_1,x_2,x_3,x_4)$$

参考 BOCR(benefit，opportunity，cost，risk)思想构建指标体系，将目标选择的准则定为打击目标的风险、目标价值和目标打击的时效性。在本例中我们假设实施打击的能力足够、各种资源充足，所以在控制网络中没有加入“打击成本”这个控制系统。打击目标选择的层次结构如图 5-3 所示。

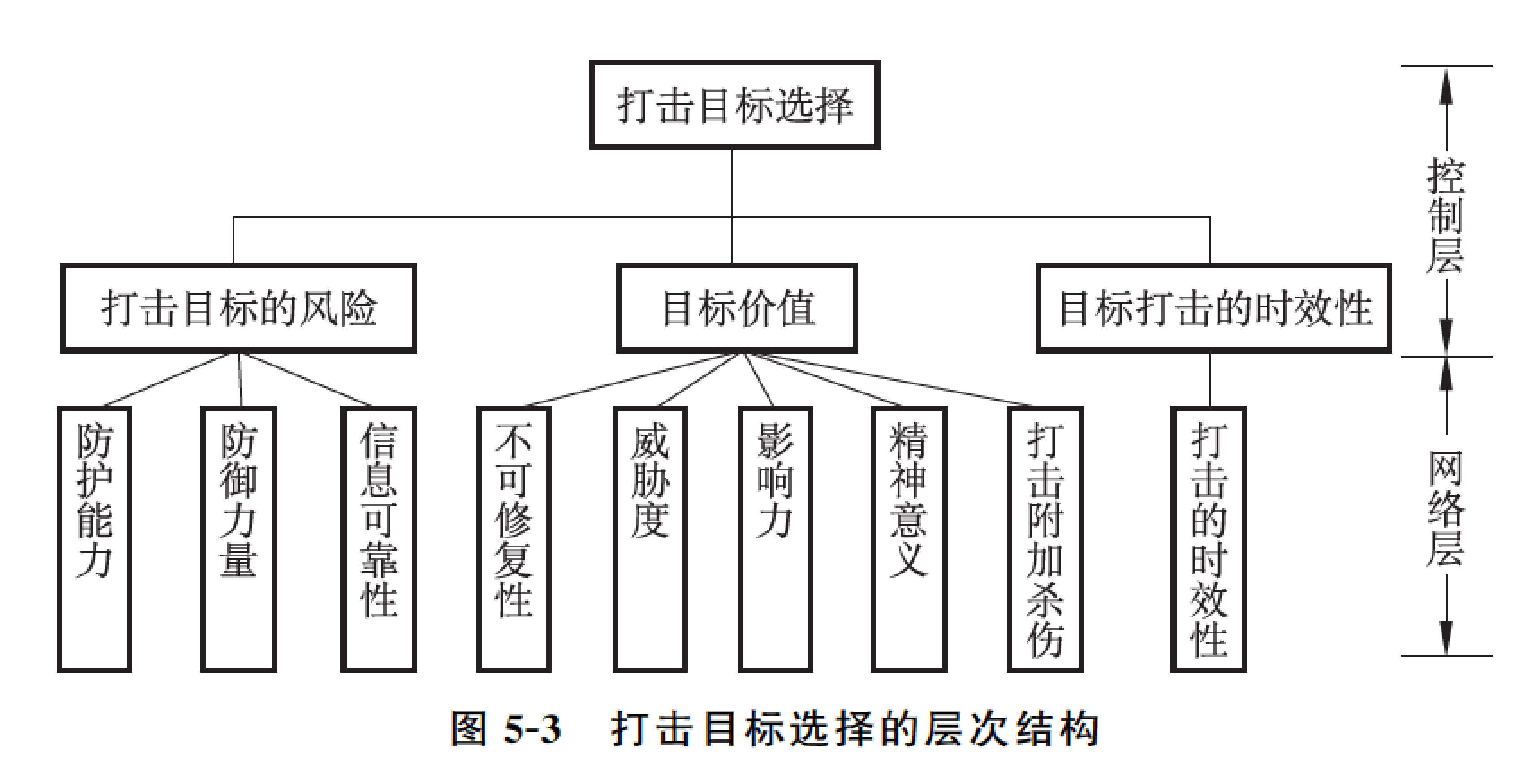


图 5-3 打击目标选择的层次结构

2. 建立打击目标选择的 ANP 模型

根据打击目标选择逻辑的特点，分析比较各个因素，得出各个关键因素的相互关联性。例如，在第一层，目标的价值影响了打击目标的风险；在第二层，目标的威胁度对信息的可靠性产生影响，目标的防御力量与目标对战场网络的影响力存在依存关系。

根据上述分析建立网络内部具有依存关系的 ANP 模型,如图 5-4 所示。

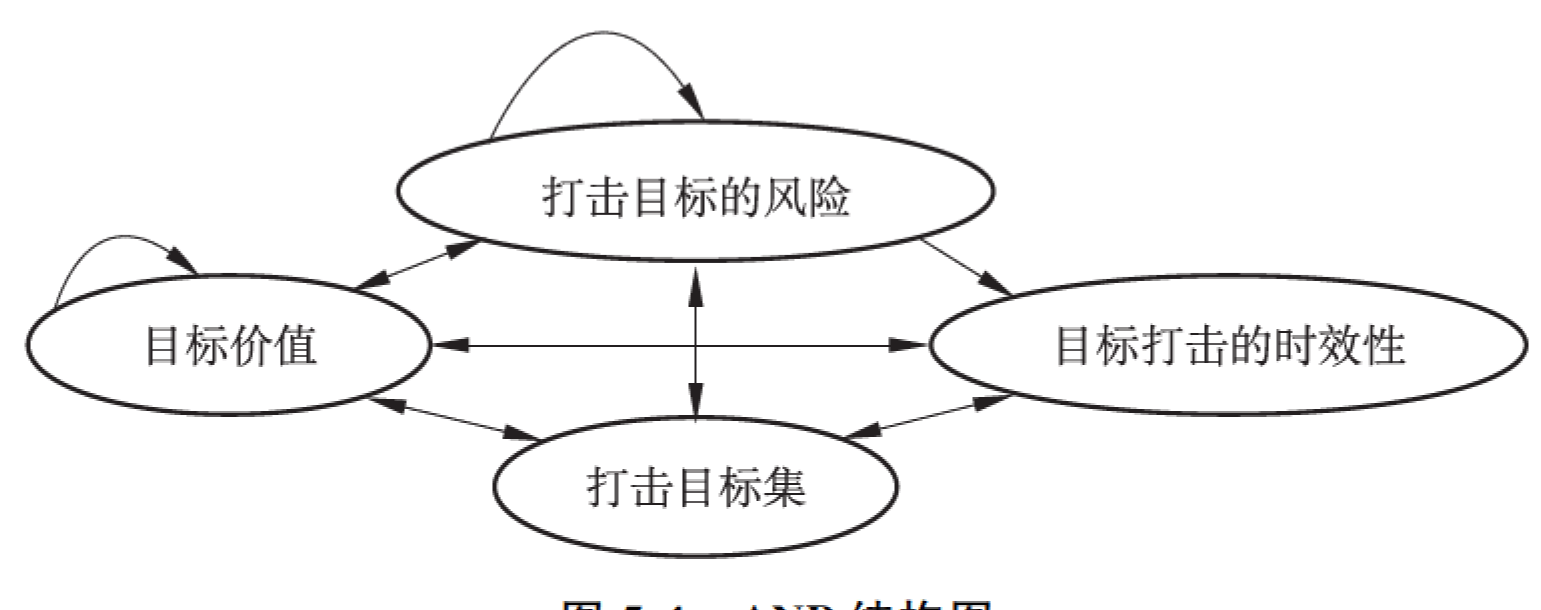


图 5-4　ANP 结构图

图 5-4 中所标箭头代表指标之间的相互关系,“A→B”形式表示 A 影响 B,“A↔B”形式表示 A、B 之间相互影响。

3. 构建判断矩阵

影响打击目标选择的各因素的重要性各不相同,我们采用 1～9 标度,确定其权重值。先通过两两比较,构造判断矩阵,确定各因素下四个打击目标的权重。以下仅以“目标价值”控制系统为例,给出相应的判断矩阵,如表 5-1～表 5-4 所示。

表 5-1　目标威胁度对备选方案造成影响的判断矩阵

目标威胁度	能源基地	指挥中心	雷达站	电视台
能源基地	1	1/3	1/4	1
指挥中心	3	1	2	3
雷达站	4	1/2	1	3
电视台	1	1/3	1/3	1

表 5-2　目标影响力对备选方案造成影响的判断矩阵

目标影响力	能源基地	指挥中心	雷达站	电视台
能源基地	1	1/9	1/4	1/2
指挥中心	9	1	5	8
雷达站	5	1/5	1	5
电视台	2	1/8	1/5	1

表 5-3　目标精神意义对备选方案造成影响的判断矩阵

目标精神意义	能源基地	指挥中心	雷达站	电视台
能源基地	1	1/7	3	2
指挥中心	7	1	9	8
雷达站	1/3	1/9	1	1/3
电视台	1/2	1/8	3	1

表 5-4　目标不可修复性对备选方案造成影响的判断矩阵

目标不可修复性	能源基地	指挥中心	雷达站	电视台
能源基地	1	1/6	2	4
指挥中心	6	1	8	9
雷达站	1/2	1/8	1	2
电视台	1/4	1/9	1/2	1

4. ANP 模型的求解

在所有判断矩阵确定之后，便可进行相应的矩阵运算，求得每个控制系统的计算结果和总排序值，这是 ANP 决策的核心工作。计算过程为：首先根据构造的判断矩阵组成超矩阵 $\boldsymbol{W}$，然后对超矩阵的元素加权得到加权超矩阵 $\overline{\boldsymbol{W}}$，最后计算极限超矩阵，从而得到目标的最终排序结果为：

$$\lim_{k \to \infty} \overline{\boldsymbol{W}}^k$$

由于这么多矩阵计算比较复杂，通常采用 Super Decision 软件，运行结果如表 5-5 所示。

表 5-5　合成排序结果

目　标	图　示	标准化权值	排　序
能源基地	■	0.1296	3
指挥中心	■	0.5720	1
雷达站	■	0.1013	4
电视台	■	0.1971	2

由表 5-5 可以发现，合成排序结果依次为指挥中心、电视台、能源基地、雷达站。敌指挥中心是我方打击的首要目标，这符合现在战争快速破击作战的思想，成功打击摧毁敌指挥中心能够快速使敌系统陷入“混沌”；以电视台为代表的新闻单位作为第二打击目标，是由于其对敌人的精神意义较大，打击它可以削弱敌战争动员能力，并在敌阵营中造成恐慌；能源基地作为打击的第三目标，是因为它的防御力量通常较强，而导致实际打击的效费比不高；雷达站排在最后是由于它的防御力量通常很强，而且由于伪装的原因，导致打击成功率不高。

四、结束语

打击目标选择是一个永恒的问题，有战争，就有打击目标的选择。本案例根据目标打击“高效、合理、够用”的要求，充分考虑决策因素间的相互影响，提出利用网络层次分析法进行目标选择的思想，应用这种方法对几个典型的打击目标进行了选择排序，并针对指挥员决策时的偏向做了灵敏度分析。对于不同的武器装备，不同的作战样式和作战任务及不同的打击对象和范围，我们可根据实际情况调整目标选择的控制系统，特别是打击的成本，并进一步做好目标的分配。



第一节　武器装备成果评价指标体系

武器装备成果评价指标体系分为先进程度，创新程度，复杂程度，稳定性，军事价值作用意义六个指标，每个指标又分若干个子指标，构成一个层次结构。

先进程度，创新程度，复杂程度，稳定性，军事价值，作用意义六个指标，综合以上指标又可以构成综合评价，也可以根据各个指标分别对各个装备进行评价，也就是对各个装备的某一个方面进行重点评价。

各个指标的具体含义如下：

（1）先进程度，是指该项目的主要技术与国内外同类技术相比较的先进程度。

（2）创新程度，是指成果在研制开发过程中，运用已知的理论、技术和方法攻克技术的难题，在技术上取得创新和进步的程度。评价技术创新程度，主要是指在原有技术上的进步大小。

（3）复杂程度，是指成果在研制过程中技术攻关的难度和复杂程度。

（4）稳定性，是指所取得的成果能应用于装备建设，其技术的成熟程度及所达到的完备程度，能否满足使用要求，如系统稳定性和技术稳定性等。

（5）军事价值，是指成果对提高武器装备作战使用性能，促进武器装备建设起到的重要作用。

（6）作用意义，主要是指从专业或者行业角度来衡量该项成果对推动武器装备建设或者推动科技进步的作用。

综合评价，按照以上的指标，从总体上评价成果。

各个指标又由各个子指标构成。武器装备评价指标体系如图 6-1 所示。

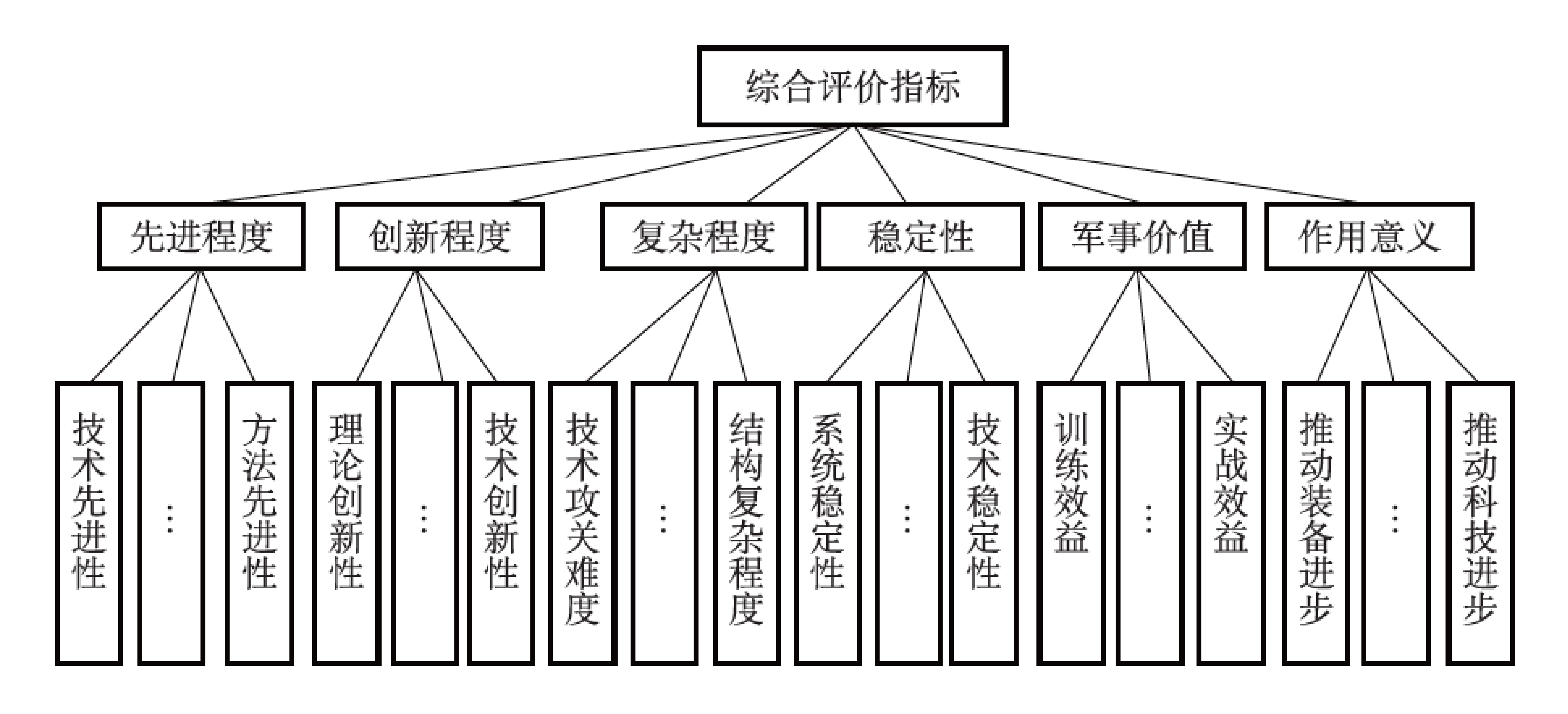


图 6-1　武器装备评价指标体系

第二节　武器装备成果的评价方法

下面介绍武器装备成果评价方法。武器装备成果的评价方法有试验统计法、指数法、专家评分法、优序法、关系矩阵法、模拟法等。

一、试验统计法

试验统计法是指在规定的现场或者精确模拟的环境中，观察武器系统的性能特征，收集数据，评定系统效能。其特点是依据实战、演习、试验获得的大量统计资料评价效能指标，应用前提是所获统计数据的随机特性可以清楚地用模型来表示，并相应地加以利用。常用的统计评价方法有抽样调查、参数估计、假设检验、回归分析和相关分析等。试验统计法不但能得到效能指标的评价值，还能显示武器系统性能、作战规则等影响因素对效能指标的影响，从而为改进武器系统性能和作战规律提供定量分析基础，其结果比较准确，但需要有大量的武器装备做试验的物质基础，这在武器研制前无法实施，而且耗费大，需要时间长。总之，试验统计法是评价武器系统效能比较可信的基本方法之一。

二、指数法

指数法是指针对系统的具体情况，建立相应的数学模型，计算反映系统能力的若干指数，再通过若干指数加权求和，得到反映系统综合能力的综合指数，如武器火力指数、综合战斗力指数等，特点是数学模型直观、明确、综合能力强使用方便，比较适合对大型系统进行客观评价。不足之处是，虽然指数法是建立在军事专家们的丰富经验之上，但其中的权系数难免受个人行为的影响，同时对要求细致描述的结构问题一般不是很适用。

三、专家评分法

对数据缺乏或者难以定量描述的指标，如对新技术项目的预测和评价、对非技术因素起主要作用的项目的预测和评价，则以专家作为获取信息的对象，进行专家打分、评价比较。一般的方法是，选取最能反映效能特征的指标，请专家们打分，然后对专家的不同意见进行处理，得到武器系统的效能。当评价指标难以定量计算

时，采用专家评分法比较有效，关键是专家的选取和特征指标的选取。另外，专家评分法的主观因素较多，操作起来有一定的难度。

专家评分法是系统综合评价时常用的一种方法。评分法又可分加评分法、加权加法评分法和乘积评分法。

设有 m 个不同的对象要评价，而评价的属性有 n 个，对每个属性规定评价标准。假设第 i 个对象在第 j 个属性得到的标值为 S_{ij}，则可用表 6-1 来表示不同对象在不同属性的得分值。

表 6-1　表示不同对象在不同属性的得分值

属性 j / 对象 i	1	2	3	…	n
1	S_{11}	S_{12}	S_{13}	…	S_{1n}
2	S_{21}	S_{22}	S_{23}	…	S_{2n}
3	S_{31}	S_{32}	S_{33}	…	S_{3n}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
m	S_{m1}	S_{m2}	S_{m3}	…	S_{mn}

1. 加法平分法

加法评分法是指把各评价属性加起来，它要求所有评价属性的标值必须是同量、同级的量纲，即要求规范化。

（1）对属性标值认为越大越好的指标：

$$\tilde{S}=\frac{S-S_{\min}}{S_{\max}-S_{\min}}$$

式中，$\tilde{S}$ 表示规范化后的指示。

（2）对属性标值认为越小越好的指示：

$$\tilde{S}=\frac{S_{\max}-S}{S_{\max}-S_{\min}}$$

（3）如果 S 为文字评语，则事先建立如表 6-2 或者如表 6-3 所示各评语对标准分的一一对应关系。

表 6-2　评语对标准分对应关系

评语	分数
优	1
良	0.8
中	0.6
可以	0.4
劣	0

表 6-3　评语对标准分对应关系

评语	分数
国际先进	1
国内先进	0.8
军内先进	0.6
同业先进	0.4
劣	0

（4）如果对评级的对象在属性中所占序号感兴趣，则可按分值排序。

$$\tilde{S} = \sum_{j=1}^{n} \tilde{s}_{ji}, \quad i = 1,2,\cdots,m$$

2. 加权加法评分法

加权加法评分法是指把人的主观因素加入到评价过程中，用权重值来反映评价者的偏好，即专家本人对属性重要程度的看法。通常用权重系数 w_j 表示第 j 个属性的权重系数：

$$\sum_{j=1}^{n} w_j = 1, \quad 0 < w_j < 1, \quad j = 1,2,\cdots,n$$

综合评分值，$\tilde{S} = \sum_{j=1}^{n} w_j \tilde{S}_{ij}$，如表 6-4 所示。

表 6-4　加权加法评分法分值

	1	2	…	n	综合评分值
	$\boldsymbol{W}_1$	$\boldsymbol{W}_2$	…	$\boldsymbol{W}_n$	
1	$\tilde{S}_{11}$	$\tilde{S}_{12}$	…	$\tilde{S}_{1n}$	$\sum_{j=1}^{n} w_j \tilde{S}_{1j} = \tilde{S}_1$
2	$\tilde{S}_{21}$	$\tilde{S}_{22}$	…	$\tilde{S}_{2n}$	$\sum_{j=1}^{n} w_j \tilde{S}_{2j} = \tilde{S}_2$

续表

	1	2	…	n	综合评分值
	$\boldsymbol{W}_1$	$\boldsymbol{W}_2$	…	$\boldsymbol{W}_n$	
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮
m	$\tilde{S}_{m1}$	$\tilde{S}_{m2}$	…	$\tilde{S}_{mn}$	$\sum_{j=1}^{n} w_j \tilde{S}_{mj} = \tilde{S}$

加权加法评分法的缺点在于当各替代方案的累计评价分数差距大时，对于哪个方案最优的问题很难得出明确的回答，为此出现了另一种评分法，即乘积评分法。

3. 乘积评分法

乘积评分法是指将评分值连乘值的大小评定优劣。则综合评分值 S_i 为

$$S_j = \prod_{j=1}^{n} s_{ij}$$

四、优序法

设有 R 个专家 $M_1, M_1, M_R, \cdots, H$ 个作为评价属性的目标 $f_1, f_2, \cdots, f_H$，N 个作为评价对象的方案 $x_1, x_2, \cdots, x_n$，则优序法的步骤如下。

Step1：每位专家针对某目标方案两两相比，得方案评价矩阵（$\boldsymbol{H} \times \boldsymbol{R}$ 个）。设第 r 专家 M_r 针对第 h 个目标，对方案 x_i 和 x_j 加以比较，比较后的值 $a_{ijh}^{(r)}$ 定义如下：

$$a_{ijh}^{(r)} = \begin{cases} 1, f_h^r(x_i) > f_h^r(x_j) \\ 0.5, f_h^r(x_i) = f_h^r(x_j) \\ 0, f_h^r(x_i) < f_h^r(x_j) \end{cases}$$

式中，$f_h^r(x_i)$ 表示第 r 个专家对第 x_i 方案在第 h 个目标下的方案价值。

Step2：针对某一目标计算方案的优序数，表 6-5 为第 h 个目标下的方案评价矩阵表。方案的优序数即按行相加，计算式为

$$a_{ih}^{(r)} = \sum_{j=1}^{N} a_{ijh}^{(r)}$$

式中，$a_{ih}^{(r)}$ 表示第 r 个专家对第 x_i 方案在第 h 个目标中的优序数。

表 6-5　第 h 目标下的方案评价矩阵表

f_h	x_1	x_2	…	x_N	$a_{ih}^{(r)}$
x_1			…		$a_{1h}^{(r)}$
x_2	$a_{21h}^{(r)}$	$a_{22h}^{(r)}$	…	$a_{2Nh}^{(r)}$	$a_{2h}^{(r)}$
⋮					⋮
x_N	$a_{N1h}^{(r)}$	$a_{N2h}^{(r)}$	…	$a_{NNh}^{(r)}$	$a_{Nh}^{(r)}$

对各个目标计算的优序数，则可得到诸目标下各方案优序评价矩阵。

Step3：计算各方案在诸目标中的优序数评价矩阵表，如表 6-6 所示。优序数也是按行相加。计算式为

$$k^i(r) = \sum_{h=1}^{N} a_{ih}^{(r)}$$

表 6-6　各方案在诸目标中的优序数评价矩阵表

	f_1	f_2	…	f_H	$k_i^{(r)}$
x_1	$a_{11}^{(r)}$	$a_{12}^{(r)}$	…	$a_{1H}^{(r)}$	$k_1^{(r)}$
x_2	$a_{21}^{(r)}$	$a_{22}^{(r)}$	…	$a_{1H}^{(r)}$	$k_2^{(r)}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
x_N	$a_{N1}^{(r)}$	$a_{N2}^{(r)}$	…	$a_{NH}^{(r)}$	$K_N^{(r)}$

Step4：计算各方案的总优序数，结果见表 6-7。总优序数计算公式为

$$k_i = \sum_{r=1}^{R} k_i^{(r)}$$

表 6-7　总优序数评价矩阵表

	M_1	M_2	…	M_R	k_i
x_1	$k_1^{(1)}$	$k_1^{(2)}$	…	$k_1^{(R)}$	k_1
x_2	$k_2^{(1)}$	$k_2^{(2)}$	…	$k_2^{(R)}$	k_2
⋮	⋮	⋮		⋮	
x_N	$k_N^{(1)}$	$k_N^{(2)}$	…	$k_n^{(R)}$	k_N

若认为不同目标 f_l 有不同的重要性，采用权重系数 w_l，则各方案在诸目标中的优序数为

$$k_i^{(r)} = \sum_{l=1}^{H} W_l^{(r)} a_{il}^{(r)}$$

式中，$\sum_{l=1}^{H} w_l^{(r)} = w_l^{(r)} \geqslant 0$。

若认为不同专家 M_r 可以有不同的权重系数，则总优序数为

$$k_i = \sum_{r=1}^{R} w^r k_i^{(r)} \ k_i^{(r)}$$

式中，$w^{(r)} \geqslant 0, \sum_{r=1}^{R} w^{(r)} = 1$ 。

五、关系矩阵法

1. 关系矩阵法

关系矩阵法是常用的综合评价方法。设有 $A_1, A_2, \cdots, A_m$ 是某评价对象的 m 个替代方案，$W_1, W_2, \cdots, W_n$ 是 n 个评价项目的权重，V_{ij} 是第 i 个代替方案的关系评价项目 $A_j (j = 1, 2, \cdots, n)$ 的价值评定量，则相应的关联矩阵法的表现形式如表 6-8 所示。

表 6-8　关联矩阵法的表现形式

	W_1	W_2	$\cdots$	W_n	
A_1	V_{11}	V_{12}	$\cdots$	V_{1n}	$V_1 = \sum W_j V_{1j}$
A_2	V_{21}	V_{22}	$\cdots$	V_{2n}	$V_2 = \sum W_j V_{2j}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
A_m	V_{m1}	V_{m2}	$\cdots$	V_{mn}	$V_m = \sum W_j V_{mj}$

2. 确定权重

应用关联矩阵法进行系统评价的关键在于正确确定各评价项目的权重（即相对重要度）W_j，以及由评价主体对评价项目所给定的评价尺度。

3. 综合评价

综合评价的做法如下。

（1）对各评价项目进行逐对比较法，比较结果相对重要的项目得分；

（2）对各评价项目的得分，经过一定的换算求得各评价项目的权重 W_j；

（3）根据评价主体给定的评价尺度，对各代替的评价项目一一进行评价，得到每一评价项目的评价值；

（4）求加权和，获得综合评价值。

六、模拟法

各种高技术武器装备造价昂贵，在部队训练中不可能经常组织实施各种实装、实弹演练，只能运用各种模拟器材来模拟高技术装备的各种作战效能，为部队进行反复演练创造出近似实战的环境和条件。在模拟的环境中对武器装备进行评价是一种接近实战的一种可信的方法。

1. 美军模拟化训练的方法

目前，美军把模拟训练作为军事训练的主要方式之一，主要包括部队模拟训练、基地模拟训练和分布式模拟训练。

（1）部队模拟训练

部队模拟训练是指采用模拟器材和作战模拟系统进行的训练。模拟器材直接用于复杂装备的操作技术训练，作战模拟系统主要用于训练指挥和参谋人员。

① 模拟器材训练方面。在空军的飞行程序训练、空中攻击训练，海军的舰船操纵、目标捕捉、反潜、海上攻击训练，陆军的炮兵射击、攻防战术训练等多种技术、战术训练课目中，都大量运用了这种方法，取得了很好的训练效果。

② 作战模拟系统训练方面。位于堪萨斯州利文沃思堡的陆军作战指挥训练中心，于 1988 年开始实施“战斗指挥训练计划”，即对师级指挥官及其参谋人员进行模拟指挥训练。它是通过广泛运用计算机模拟演练与逼真的敌方部队进行对抗的作战原则，并在指挥的各个环节进行合成实践。这种训练既可以提高高级指挥

官和参谋人员的指挥水平，又可以检验作战指挥程序，使作战指挥程序标准化。1994 年上半年美海军先后 5 次以我军为假想敌进行计算机模拟演练。演练设想 2010 年美海军第 7 舰队及其支援力量在中国沿海巡逻时，触发中美海战。计算机模拟显示我军拥有岸基和潜射精确制导远程巡航导弹、战场机器人等先进的武器装备和快速部署能力，而在空间部署了包括反卫星系统在内的武器系统。中国军队首先以反卫星系统击毁美侦察卫星，并向前进基地快速部署海空兵力。随后以大量的岸基和潜射精确制导远程巡航导弹齐射美指挥舰和航母，以导弹、航空兵攻击美编队作战舰艇，最后美指挥舰和航母被击沉，航母编队其他作战和辅助舰只被重创。

(2)基地模拟训练

训练基地是美军进行正规集体训练的重要场所。各训练基地都集中采用了模拟训练的方法，其中设在加利福尼亚州欧文堡的国家训练中心是美国陆军最大的训练基地，该中心的模拟训练最具有代表性。

国家训练中心建于 1980 年，占地面积 2 600 平方公里，其中训练场地 2 250 平方公里。这里气候干燥，人烟稀少，地形复杂，既有沙丘又有高地。基地内设有对抗演习、实弹射击、后备役部队三个训练场地，设置了 100 多个种类目标，安装有现代化电子设施、光学模拟训练设施，为受训部队提供了一个近似战场的环境。基地内还驻有一个坦克营和一个机步营的专任假想敌部队，按原苏军摩托化步兵团编成，由经过特别挑选的 1 000 多名官兵组成，在国家训练中心服役 4 年，这就为受训部队提供了一个近乎真实的对手。此外，还有 300 多人的施训和管理部队。训练过程一般分三个阶段：第一阶段，模拟美本土部队增援海外战区和战略空运。受训的坦克营、机步营及旅司令部人员从其驻地空运到欧文堡基地附近的空军基地，而后通过陆路开进欧文堡，领取预存作战装备。第二阶段，进行逼真的、近似实战的合成训练。轮训部队在战术空军支援下与假想敌部队进行地面攻防作战与电子对抗演练。第三阶段，进行实弹射击。训练射击场设置的由电子计算机控制的自动隐现目标，显示敌军的各种兵配置。训练中心配置的多种综合激光模拟交战系统装在陆军各种武器上，射出激光编码束。射击后，目标(人或车辆)上的该系统可计算出是轻伤还是致命伤，以及对武器的毁伤程度整个演练过程摄制成录像，成绩由计算机运算，作为鉴定的重要依据，为参训军官和部队提供极为有用的训练档

案。该训练中心每年可施训陆军 14 个旅 42 个营。目前,已有 930 个营次在此训练过。进入 20 世纪 90 年代后,该训练中心又建立了模拟火炮和空中火力系统,研制能穿透烟雾的激光交战系统,建成了可进行模拟的模拟器网络。

国家训练中心实兵对抗的主要特点是:①具有较强的实战对抗性。训练中心作战环境真实,近似实战,驻有一支训练有素的反方部队,具有丰富的经验。在演习过程中强调针锋相对,独立性、竞争性强,实战气氛浓,能够极大提高部队实践能力。陆军有关数据表明,经过国家训练中心训练的部队在作战中取胜的概率比未经训练的部队高 15 倍。②以现代化设施保障演练。训练过程中运用激光和电子多种模拟手段进行演练,不仅可以实施各种对抗演习,而且可以详细记录、分析各种训练材料,向受训部队提出改进意见和建议。③提高协同作战能力。与实战一样,在营旅指挥所设置火力协调组,由炮兵连连长任协调组组长,空军向指挥所派联络官,以全面协调对步兵装甲兵火力支援。由于该中心与内利斯空军基地相邻,便于进行陆空协同作战演练。

(3)分布式模拟训练

美军认为"虚拟模拟是 21 世纪的主要训练方式",并加紧研制各种模拟系统。已研制的虚拟现实模拟系统可在视觉、听觉和触觉等方面逼真地显现了未来战争中可能出现的各种情况,可训练没有打过仗的指挥官身临其境地体验战争,可使驻扎在世界各地的部队通过互联网同时演练同一想定,可在同一模拟系统上演练在不同国家、不同地形、不同气候条件下与不同作战对象实施的各种不同的战争行动。

美国拥有联结欧、亚、美的计算机网络,因此美军可以利用现成的计算机网络系统进行模拟演练。在美韩"乙支·焦点透镜"演习中,美国成功运用了联结亚、欧、美三大洲的计算机网络系统,进行了全球应急支援朝鲜半岛作战的演练。

美军的年度演习"回师德国",原先需将部队从美国本土输送到德国展开,通常要进行大规模的调动,最多时达 4 万人,并需支付因破坏环境而导致的大量赔偿。在 1994 年举行的该演习中,美军依靠防务模拟网络,仅调兵 2 500 人,避免了大规模的部队调动,节约了大量经费。目前美军的这种高级分布式模拟训练系统主要有:

① 训练模拟器。该系统利用图形仿真技术,模拟实物实景,安装在单个坦克、装甲车或飞机上,可进行车组与机组人员的训练,将车组与车组训练模拟器、机组与机组训练模拟器联结在一起,便可以训练部队协同作战。不同类型的模拟器也

可以联结，或是异地相连，可使分布在各地的参训部队共享一个数据库，使射击程序、指挥控制、远距离空中人力支援等的训练都用模拟方式进行，而不必运用装备和大规模调动部队。

② 冲突模拟。该系统利用模拟各种预想的冲突，用于各级参谋机构训练和特种作战能力的训练。美海军正在投资建立的冲突模拟系统能够联结各舰艇的所有战斗系统以及舰队基地系统，可分别训练海军的防空、突击、火力支援和水面作战等，也可进行综合演练。

③ 辅助系统。辅助系统主要用于辅助训练模拟系统，这些辅助系统将射击靶场、坦克、装甲车、定位报告系统与使用多用途激光交战系统的模拟器及冲突全景模拟器联结在一起，可为部队进行单一军种和联合训练提供一种由计算机支持的逼真的训练环境，使参训部队获得一流的训练效果。

2. 美陆军“六大战斗实验室”和“路易斯安娜演习”情况

美军在1992年成立了六大战斗实验室：弗吉尼亚州门罗堡的“杀伤力生存作战实验室”、俄克拉何马州西尔堡的“纵深与同步攻击实验室”、肯塔基州诺克斯堡的“乘车作战空间实验室”、堪萨斯州利文沃斯堡的“作战指挥实验室”、佐治亚州本宁堡的“徒步作战空间实验室”、弗吉尼亚州利堡的“战斗勤务支援实验室”。1993年开始实施“路易斯安娜演习”，使陆军部队能保持高度战备水平，同时也为陆军的变革提供了理论依据和动力。

六大战斗实验室分别针对战场上影响最大的六个方面进行实验，即：增强早期进入部队的杀伤力和生存力；扩展和控制徒步战斗空间；扩展和控制乘车战斗空间；在保护己方部队的同时在战场的整个纵深全方位打击敌人；在运动中及时实施指挥并向所有部队传递近乎实时的信息；使用和再次使用宝贵的资源，以便在战争和战争行动中维持部队的战斗力。战斗实验室在实验中广泛采用各种模拟手段，其类型主要有三种：一是结构模拟。由各种军事演习想定方案和程序组成，这种模拟大量应用了程序设计和数学方法，主要用于推演战斗发展过程。二是虚拟模拟。即在大量的人工模机器及其他模拟器材共同营造的作战气氛中进行实验，使用新技术和样机的模拟可以降低实验的费用。三是实兵模拟。即真正的士兵和装备一起运作参加。

“路易斯安娜演习”计划是美陆军从1993年开始实施的系列演习计划，以加强

部队作战能力和发展未来作战思想。该计划的实质在于利用计算机与各司令部及各军种等有关单位联系起来,创造一种共享的人工合成环境,进行分布式交互模拟实验和演示,通过计算机模拟等综合性现代化手段,研究和探讨新形势下陆军部队建设的重大问题。该演习计划以计算机模拟为主,以战例分析和实兵演习为辅。其中作战模拟主要有三种类型:一是环境模拟。由人工操作各种模拟器通过创造各种逼真的合成环境,为陆军提供一种廉价的演练手段,以训练和考核指战员。驻德美军曾用该方式编制了波黑的地形数据库,帮助可能部署在该地区的美陆军部队进行训练,取得了很好的效果。二是结构模拟。建立计算机化的军事演习模型,用预编程序进行"战斗",替代大规模实兵演练,可大大缩小参演部队的规模。三是实兵模拟。在野战条件下由士兵使用实物装备进行演习,并用仪器记录和显示演习的全过程,对某些重要的战场现象(如夜战)进行模拟。这三种模拟方式可单独使用,也可结合使用。该计划具有以下优点:

(1)有利于部队训练和保持良好的战备状态。利用计算机模拟技术,可脱离实物武器装备和大面积经常、反复地进行军事训练,使指战员的技术、战术水平通过反复演练不断提高。

(2)有助于缩短武器装备的研制周期。利用计算机模拟方法,可高效、准确地检验武器系统的设计方案,以及战术、技术性能标准的合理性,并可随时发现和及时解决研制过程中出现的各种问题,还可少做或不做实物样机,达到有效利用时间、缩短研制周期的目的。

(3)有助于制定正确的条令、战术和合理的编制。利用计算机模拟技术可对新制定的条令、战术和编制反复模拟、反复修改,使其逐渐趋于合理并达到最佳水平。

(4)有助于评价新武器的效能。利用"战斗综合测试与训练评定系统"可较简便地对武器装备的作战效能进行评定,这样可做到在战前而不是战后对武器装备进行检验,既经济又省时。

3. 模拟训练的发展趋势

依赖高技术的作战模拟,随着迅速崛起的信息革命也在进一步发展,并呈现出以下趋势。

(1) 从集中式模拟向分布式模拟发展

集中式模拟是将整个模拟系统集中在一个或几个相邻建筑内，通过统一管理方式进行模拟。例如，美军的安那波利斯海军学院是美海军海战模拟训练中心，参训人员要想来此训练，必须从太平洋、大西洋、印度洋和地中海的各个舰队经长途跋涉才能使用这些设备。现在通过“分布式模拟”可使不同地域的作战单位及各级指挥官在“同一个环境”下进行作战模拟训练。

(2) 从单项演练向协同作战和空地一体联合作战演练发展

美军认为，任何一个单一的军种都无法靠自己的力量来研制一个具有广泛适应性的模拟系统，军种间联合演习变得更为重要。为此，各军种间应达成体系结构和标准化协议的统一。1988 年美国防科学委员会关于把计算机应用于训练和作战演习的一个专门工作组发表评论说：“各军兵种应用于训练的大部分结构仿真都不具有互操作性，因此建议采用一些措施。”所以，高级研究计划局开发了聚合层仿真协议（ALSP），以互联战区级结构仿真，并且很快成功地用于广泛地支持联合的和合成的训练演习（如“大西洋决心”、“统一企图”、“乌尔齐聚焦镜”）。1994 年 1 月国防部批准了“国防部建模与仿真”主计划，该计划建议“扩大真实的、虚拟的和结构仿真相结合的仿真结构工作”，以开发分布式交互仿真（DIS）标准和协议，以保障地理上分散的异地的真实、虚拟和结构仿真的互操作性。这就从政策、管理、资金、技术力量等方面保证了该标准的建立和执行。美军正在研制的“分布式交互模拟系统”可使参加演习的各军种部队进行协同演练，并与各国部队进一步进行协同演练。

(3) 通信指挥控制与情报系统逐步纳入模拟环境之中

在模拟训练时，通常不使用真实的通信指挥控制与情报系统，因此这些系统无法接受模拟训练的检验，从而在战时可能出现意想不到的麻烦。美军在分布式模拟训练中，使用与战时相同的通信装备和侦察报知器材，可对武器系统、通信系统、人员素质和指挥艺术做一体化的检验。

4. 美军模拟训练新动态

从海湾战争到伊拉克战争，美军从作战指挥官到普通士兵、飞行员、海军陆战队队员和水手，其素质都是比较高的，这不能不归功于美军在以国家训练中心（陆

军）、关塔那摩湾（海军）、二十九棵棕榈树（海军陆战队）为代表的一大批训练基地进行的艰苦的、近似实战的高水平训练。科索沃战争结束后，美军在军事训练方面除了继续强调以实战为标准外，更加重视把新技术，尤其是以计算机为主体的数字化模拟技术引入训练领域，联合与联军训练成为训练的新重点。

在解决作战训练的“真实性”问题上，主要借助虚拟现实技术，提高模拟训练的仿真度。训练是战场上取得胜利的基石。然而，“训练必须建筑在战场要求上，必须经得起战场的最终检验”。从这个意义上说，军事训练的一切都源于战争和作战的需要。针对未来高技术作战的战争形态、战斗样式、作战对象和作战环境等背景，高度逼真地按实战要求进行训练成为美军军事训练改革的要点。美陆军1980年就在欧文堡成立国家训练中心，参加海湾战争的陆军有10万人在国家训练中心受训过。此外还建立了阿拉斯加寒带作战训练中心、山地和高原作战训练中心、德国贺汉弗尔斯作战训练中心等，为在不同环境下训练部队创造了条件。目前，美军新开发的虚拟现实模拟系统，为使用者创造出近乎真实的立体环境。

在解决部队训练的“规模性”问题上，主要借助网络技术，把大部队与联合训练纳入日常训练科目。以前，进行实战训练的规模一般只能达到营一级，更大规模的演练主要以演习形式进行。由于需要动用大量装备与人员，进行远距离运输，实施部队的大规模机动与展开，给环境保护与演习区居民生活都带来了不利影响，大部队演习难以变为日常训练科目。现在，美军已经清楚地认识到未来的军事行动将是联合作战，联合训练应该成为部队训练的重点内容。借助网络技术把不同模拟系统连接起来，就可以对规模庞大的部队进行合练。比如，将安装在单个飞机和战车上的模拟器连接起来，把不同兵种的一体化模拟器连接起来，便可进行合同与联合训练；通过区域网络、全国网络或全球网络（如利用互联网）进一步联网，便可进行异地、异国的联合或联军训练，分布在世界各地的参训部队可以使用同样的数据库，提取相同的战场图景，演练同一作战想定。网络技术使部队足不出户便可参与各种训练，这对多军种联合训练、盟国的联军训练以及现役与后备役的合练提供了极大的方便。

在解决敌人与冲突的“多样性”问题上，主要借助模型与数据库技术，培养单个人员与部队的多种能力。建立各种数据库，保存各种各样的冲突模拟训练方案，可

以有效地解决假想敌和冲突形式多样化的问题。美军在对抗训练中需要各种各样的假想敌，冲突形式也不只限于欧洲和中东战场的常规作战。假想敌与冲突模式的多样化，使过去的训练方法（培训假想敌部队和建设大型训练基地进行实兵实况训练）显得落后，而模拟对抗则可以逐渐代替实兵对抗，在模拟作战环境中作战双方的用户群（如导弹防空系统与突防机群）可以利用计算机模拟系统的交互作用进行对抗训练。有些不可能在现实生活中创造的冲突模式与场所（如核生化战场条件与城市作战等），可以利用模拟技术轻松地创造出来，填补了过去训练的空白点。

第三节　武器装备成果全过程评价模型

武器装备成果评价需要全过程评价，包括：装备发展规划论证，也就是事先评价；装备建设过程中的评价，即事中评价；装备研制或者配置完成后，对装备建设的目标实施情况以及装备建设的水平、效果和影响所进行的评价，即事后评价；装备建设完成一段时间之后的后效评价，即跟踪评价。

一、事先评价模型

事先评价模型是在装备建设实施前对实施该项建设的必要性和可行性所进行的评价。事先评价又称为事前评价、立项评价。建立科学的立项评价指标体系和方法，可使科技项目管理程序化、规范化，增加决策的科学性，是实现预期科研目标的先决条件之一。

事先评价主要是对拟设立的科学技术计划的必要性、可行性及其定位、目标、任务、投入、组织管理等进行评价，为战略决策、计划设计和组织实施提供依据。模型如下。

第 i 个项目的得分为

$$S_i = \sum_{j=1}^{k} C_j W_j$$

式中，C_j 表示指标 j 的值；W_j 表示指标 j 的权重。

将项目的得分按高低排列，假设 d_i 表示第 i 个项目所需要的科技资源量，D 表示有限的科技资源总量，则有

$$\sum_{i=1}^{m} d_i \leqslant D \leqslant \sum_{i=1}^{m+1} d_i$$

得分排序为前 m 个有限的装备建设计划项目得到资助。

二、事中评价模型

事中评价模型是在装备建设实施过程中对该项建设是否按照预定的目标、计划执行，并对未来的发展态势所进行的评价。评价的目的在于发现问题，调整或者修正目标与策略。事中评价主要是对装备建设计划执行中的进展情况及存在的问题进行评价，为装备建设计划的后续安排和调整提供依据。模型如下。

第 i 个建设项目的得分为

$$S_i = \sum_{j=1}^{k} C_j W_j$$

式中，C_j 表示指标 j 的值；W_j 表示指标 j 的权重。

设目标预警值为 R，当 $S_i \leqslant R$，建设项目将被预警甚至中止、撤销。

三、事后评价模型

事后评价模型又称为验收评价模型，是指在装备建设完成后对装备建设的目标实施情况以及装备建设的水平、效果和影响所进行的评价。主要是对科学技术计划目标的实现程度、完成效果与影响、经费投入的效益、组织管理的有效性等进行评价，为科学技术计划的滚动实施、调整或者终止提供依据。模型如下。

第 i 个建设项目的得分为

$$S_i = \sum_{j=1}^{k} C_j W_j$$

式中，C_j 表示指标 j 的值；W_j 表示指标 j 的权重。

如果某个项目得分越高，说明该项目越有成效。

四、跟踪评价模型

跟踪评价模型是指在装备建设完成一段时间后的后效评价，重点评价装备建设的整体效果，以及目标制定、计划管理等综合影响和经验，从而为后期的装备建设决策提供参考。跟踪评价一般是指建设项目完成一段时间（有时长达几年）的评价，重点在于技术的创新与集成水平、关键技术的突破与掌握、技术标准研制、军事效益等方面。

模型如下：

第 i 个建设项目的得分为

$$S_i = \sum_{j=1}^{k} C_j W_j$$

式中，C_j 表示指标 j 的值；W_j 表示指标 j 的权重。

如果某个建设项目得分越高，说明该建设项目越有成效。

从表面上看，四个模型是一样的，但实际上它们的差别主要体现为指标及其权重的不同。

装备建设项目生命周期的不同阶段对应着不同的评价指标，需要采用不同的评价方法。

装备建设项目评价阶段与装备建设项目生命周期之间的关系如图 6-2 所示。

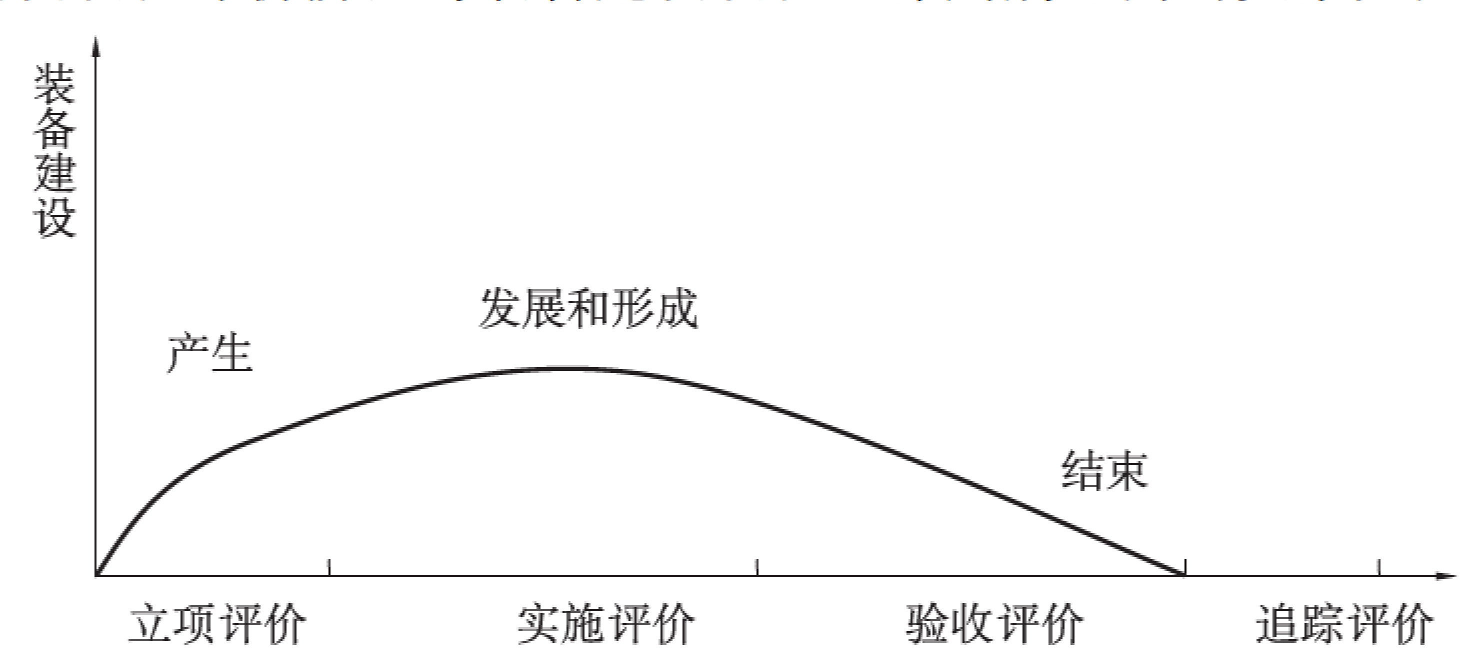


图 6-2　装备建设项目评价阶段与装备建设项目生命周期的关系



纵观当今世界各国战略管理领域，路线图作为一种新型、实用的战略管理方法和工具，越来越受到各国政府、军队、部门和企业的高度重视，在战略规划评价、技术侦测和项目管理领域中，正发挥着越来越重要的作用。

路线图在管理或组织活动上，类似于日程安排计划。一个路线图，必须具备目的地、日程计划、出行工具（组织措施）、路线选择（及备选方案）、里程碑（中间目标）等要素。

第一节　路线图的基本概念

路线图是一种先进的规划计划方法和管理工具，主要用于对现实起点与预期目标之间的发展方向、发展路线、关键事项、时间进程及资源配置进行科学评价和控制，主要采用图标的方式进行形象表达，其要义是围绕目标任务，强调需求牵引，选择发展路径，明确时间节点，具有可行可操作的具体方法和手段或者技术，对建设发展做出科学规划。

路线图是一种管理工具，它作为众多管理方法和工具的一种，可以广泛运用于各种具体的业务领域。由于不同领域的现状、目标、方向、路径将会存在较大差异，路线图的具体运用也会有不同的思路和模式。

路线图是一种发展过程。它不仅包括起点和终点，更重要的是明确了从起点到终点的方向和路径，设计了随着时间向前推移的各个节点，涵盖了事物发展的主要进程，是连接现实与未来的纽带。

路线图是一种综合集成。它充分考虑了影响和制约事物发展的各种相关因素，并将各种相关因素放在同一环境中通盘考虑，使管理人员对事物发展的相关性有更加深刻的认识，有效防止了顾此失彼、一叶障目的问题。比如，半导体芯片问题，如果尺寸做的越来越小，但容量要越来越大，这里就会有一些关键技术问题。那么现有的科学理论是否能够支持技术的发展？如果不能，影响它的关键问题又是什么呢？有没有一种方法可以找到科学与技术之间的相关性？找到科学问题之间或技术问题之间的关联性？如果有这样一种方法，就能清楚地知道先解决什么问题、后解决什么问题。这样，在以后的创新中，就可以找出解决问题的路径，做出有效的安排。这种方法就是路线图。

路线图是一种图表结构。为了达到形象、直观、生动的目的，路线图一般主要采用各种图示方法与文本相结合的方式，对事物发展的要素、方向 、顺序、路径进行综合表达，给人“会当凌绝顶，一览众山小”之感。值得注意的是，路线图往往不是一张图，而是一系列图表和文本的统称。

路线图是一种操作依据。在地理领域，路线图含有准确、可靠、可操作之意。同样，管理领域的路线图通常采取量化的方式，对事物发展进程中的重要工作和项目进行较为精确的描述，从而为管理者在操作中提供较为具体的参照和依据，达到准确控制的目的。路线图不同于一般的规划技术和技术预见，主要采用定性分析与定量分析相结合的方法，使发展目标更加清晰；采用目标与现状对比分析的方法确定发展需求，使需求与建设发展实际结合更加紧密；采用优选关键技术和实现路径的方法，使建设项目的安排更加科学、合理；采用文图结合的表现形式，使规划内容更加简明、直观；采用动态更新的方法，使定期修改的文本指导性、针对性更强。

总之，路线图既包括对未来的预测，也包括对现实的认知；既包括对目标的确立，也包括对过程的设计；既包括宏观的预测，也包括微观的前瞻；既包括系统的分

解，也包括系统的综合；既包括图示的形式，也包括文本的融合，是战略管理的重要方法和手段，是提升战略管理能力的有效途径。

由于路线图的应用领域不同，路线图相应地会产生各种分概念。只要与具体的建设与发展领域结合，就可以产生相应领域的路线图，如信息化建设发展路线图、技术路线图、转型路线图、发展路线图、体制改革路线图、人才培养路线图等。

路线图作为一种战略规划的方法也可以从宏观、中观和微观上分别理解。宏观的路线图是对整个领域、整个范围、全系统设计具有权威性指导的路线图。比如，美国的军队转型路线图，涉及作战体制、武器装备、教育训练甚至军事文化。中观的路线图指某一军种、战区等的建设发展路线图，也可指某一领域的发展。微观的路线图是指某一具体产品、装备或具体技术的路线图，如美国 2020—2025 年无人机发展路线图，主要是通过对军事需求分析研究、关键技术分析研究、作战应用研究，提出具体的装备与发展路径。

第二节　路线图的构成要素

所谓要素，是指构成事物的必要因素。不同领域的路线图，其构成要素的名称或区分往往存在较大差异。但是，从路线图的基本定义，我们仍然可以抽象出一些共同的要素，作为路线图一般意义上的要素。

参考借鉴路线图的本义，用于管理学领域的路线图一般应包括下列十大构成要素。

1. 目标愿景

没有起始点和目的地，也就无所谓路线图。因此，目标愿景是路线图的基本构成要素。目标愿景是反映主体所要达到的境地或标准，主要是基于对建设现状和支撑条件的可行性分析。目标愿景可以分层次分类型确立，也可以分阶段确立。

2. 发展思路

思路决定出路，思路一变天地宽。发展思路是对发展问题的根本看法的总称，一般是指人们在观念层面对发展的认识与理解。发展思路决定着发展的方向、重点、原则和效率等重大问题。发展思路贯穿于路线图制定的始终，是路线图制定的主旨与灵魂。

3. 需求分析

需求分析主要是针对规划目标与建设现状之间的差异，找出薄弱环节，对建设发展提出具体需求和量化指标。无论在什么领域，需求分析一般采取定性与定量相结合的方法，并尽量采用量化的方式表达。

4. 发展环境

环境是指和发展主体有直接或间接的物质、能量和信息交换的所有发展主体自身系统以外的系统综合。发展环境一般包括社会、政治、经济、军事、技术环境。不同的发展主体，其所处的发展环境是不一样的，一般要根据具体情况做具体分析。比如，信息化建设所处的发展环境包括世界、国家的信息化环境以及网络文化环境等。

5. 发展内容

发展内容是对发展主体做进一步区分，找出影响和制约发展主体的相关子因素及关键事项。比如，在一般的技术路线图中，将技术发展的相关领域区分为项目、技术、产品等多个子内容，每一个子内容都设置了相关子系统。

6. 重大任务

重大任务是指在从起点向目标愿景迈进过程中的重要工作、关键项目、重大系统、核心技术等重要工作。正是通过这些工作的逐步完成，才可以逐步向目标愿景靠拢。

7. 时间阶段

时间阶段主要是对事物发展的进程和时间范围进行明确。比如，我国的五年

规划、十年规划分别确定了五年、十年的发展时间。

8. 发展路径

发展路径主要是依据时代背景和发展趋势，根据目标任务，采取工程化推进的方法，对发展内容和项目的发展顺序、建设重点、里程碑标志和时间节点做出安排、统筹与设计。

9. 保障条件

保障条件主要是指对实现发展目标的人力、智力、信息、财力资源等，结合项目、计划和进度进行统筹安排。这些资源是完成系统发展的重要支撑，必须进行科学安排与周密配置。

10. 配套措施

配套措施主要是抓住影响建设发展的相关因素，通过配套措施的实施，建立有利于路线图实现的良好环境。

路线图的构成要素如图 7-1 所示。

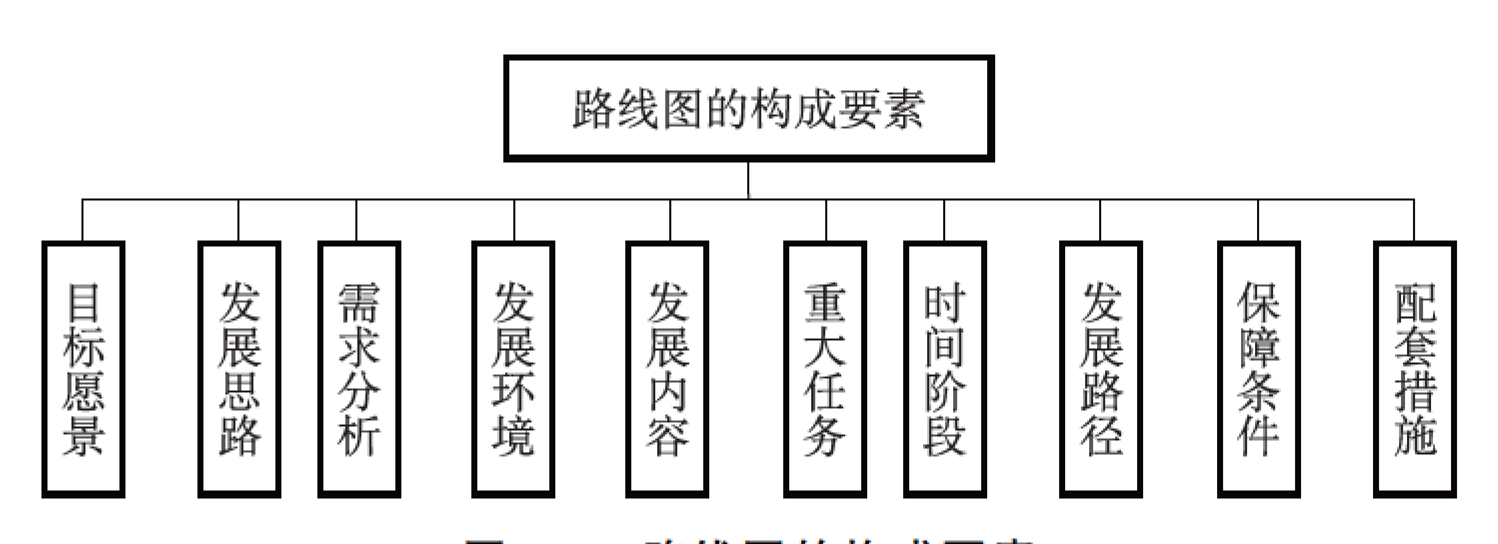


图 7-1　路线图的构成要素

在路线图中，上述要素可通过一张图表进行总体设计，也可通过多张、多格式的图表反映出来。虽然表达形式多样，但它们都是为了回答三个问题：我们去向何方？我们处于何种状态？我们如何到达目的地？

（1）路线图的顶层。主要列出了组织或单位期望的目的（知道为什么），以及目的的影响因素（如趋势和驱动因素），也包括现状分析与需求描述。通常，在国家、政府和军队层面，该路线图包括外部的战略环境和内部的发展条件，以及战略

需求和发展目标。

（2）路线图的中层。主要是关于通过什么原理，分解何种领域，关注哪些重点，通过什么路径实现预期目的。一般包括发展领域、发展内容、重大任务、发展路径、时间节点等。这一层次的区分一般根据具体建设领域确定。比如，在公司层面，发展领域一般包括技术、产品、服务和运作，反映实际的“知道是什么”，直接与业务内容发生关系。

（3）路线图的底层。主要是包括实现预期目的的各种相关资源支撑，如人力资源、信息资源、财力资源等。在路线图中，通过调配和集成，开发出使这些资源转化为预期目标实现的平衡和优化机制。

实际上，路线图方法与“5 个 W 和 1 个 H 法”有着基本相同的目的。在“5 个 W 和 1 个 H 法”中，一般性的问题转化为“谁”（who）、“什么”（why）、“何处”（where）、“何时”（when）、“为什么”（why）、“怎样”（how）这样的疑问词引起的具体问题。W 和 H 型问题提出后，再分别对这些问题加以考察分析，找出适合问题解决的方法。在路线图的设计与制定过程中，也都涉及“5 个 W 和 1 个 H 法”的相关问题，其主要用途也是为系统地收集与问题相关的信息提供基本框架，由此而收集到的信息可能为问题的解决提供一套系统的视角和方法。

通过上面路线图的构成要素分析可知，路线图实际上是将影响和制约事物发展的多种因素综合起来，通过系统分析它们之间的制约关系和相互作用，由发展性思维走向收敛和集成，使复杂的问题变得简单，使混沌的思路变得清晰，最终通过综合集成，形成定位明确、路径科学的实施方案。

第三节　路线图的应用领域

从实践看，路线图可以应用于多个领域、多层管理的整个过程，包括战略规划、系统规划、技术规划、方案选择、资源配置、风险决策及技术评价等。

一、路线图应用于战略总体规划

路线图作为一种综合性的战略规划工具，特别适用于宏观的战略规划行为，可以帮助国家、政府和军队更好地把握未来的战略环境、市场竞争、军事需求等，以确定未来的方向、项目、装备、产品等，并就一些关键事项的发展提出未来的总体规划。比如，在技术路线图领域，2004 年 Robert Phaal 定义技术路线图是一种非常灵活的技术，已经被国家、行业、企业广泛应用于长期战略规划。它提供了一种结构化和图示化的方法，有效地规划出一段时间内不断发展变化的市场、产品和技术之间的关系。比如，激光打印机技术在英国的兴起和应用，很大程度上归功于众多企业应用技术路线图进行战略规划。2004 年，美国罗彻斯特大学技术学院 J. James 博士使用技术路线图规划出了美国从 2004 年到 2020 年的能源消耗路线，其中涉及太阳能技术、风能技术等，取得了较好效益。美国陆军军官成长路线图详细规范了陆军军官成长的学历、经历、任职等具体要求，为美国陆军军官的成长设置了科学的发展路径。

2007 年 3 月 21 日，澳大利亚国防部公布了 2007 年版《网络中心战路线图》。该路线图从作战力量运用、信息优势、信息支援、指挥控制、部队部署、部队保护、部队保防等方面描述了到 2020 年澳军的能力构想。

二、路线图应用于战略执行评价

在战略评价领域，路线图也可以广泛运用，用以帮助识别战略行动的偏差，及时对战略行为与效果进行评价。比如，技术路线图在科学领域的应用与工业领域有一点非常明显的不同之处是，工业领域主要关注市场，而科学领域则更多关注科学研究和未来应用的问题。技术路线图作为一种技术评价工具则正好承担了这个联系研究和应用的决策。主要有两种方法：

第一种方法是先列出研究活动试图实现的各种特殊功能，然后设计规划一系列产品蓝图来综合上述的各种特殊功能。那么到底哪种产品可以综合所有功能，

又有哪些研究活动可以实现这些功能？技术路线图的应用便可有效解决这个问题。

第二种方法是先提出一些应用的思路，将这些思路作为技术路线图的起点，然后调查是否有可行的技术措施，以及实现这些应用需要解决什么问题，所以可以称这种方法为回溯法。具体采用什么科研行为来实现新技术是未知的，同样需要采用技术路线图来进行综合评价。

2008年1月16日美军发布《空军武器系统路线图》，它将为美空军规划应对21世纪国家安全威胁所需的能力，对"全球警戒"、"全球到达"和"全球力量"三种能力进行了阐述，要求空军对当前部署有传统武器系统的基地进行评价，预备将来由未来武器系统替代传统武器系统。还要以《国家环境政策法案》为依据对基地进行全面的环境审查，这也是最终决定未来武器系统所部署地点是否合适的关键因素。评价未来几年内将进行的费用分析和作战分析的结果，将决定武器系统的最终部署地点和进度，《空军武器系统路线图》中并不包括在美国以外的部署计划。空军未来武器系统的海外部署将与盟国通过正常协商达成共识后再实施。

三、路线图应用于装备开发

在国防和军队建设领域，经常需要安排一些重大装备或产品的开发与生产。这些装备的开发与生产，需要综合考虑需求、资源、技术、人力等多种因素，而运用路线图就可以实现重大装备的顺利开发。

2008年1月16日美军发布的《空军武器系统路线图》对"全球警戒"、"全球到达"和"全球力量"三种能力进行了阐述。"全球警戒"是指利用空中、空间和网络空间的各种作战系统实施侦察和监听的能力，可实现该种能力的下一代武器系统，包括MQ-1"捕食者"无人机、RQ-4"全球鹰"无人机和分布式通用地面系统等；"全球到达"是指空军依赖运输飞机的航程、载荷和机动速度将物资、油料和作战人员运送到敌对地区的能力，可实现该种能力的下一代武器系统，包括下一代加油机KC-X、"联合运输机"等。"全球力量"则是指快速和精确打击能力，可有效威慑和阻止

敌方发动战争,可实现该种能力的下一代武器系统,包括作战搜救直升机 CSAR-X、F-35A“闪电 I”战斗机、F-22A “猛禽”战斗机、下一代轰炸机、MQ-9“死神”无人机、CV-2“鱼鹰”倾转旋翼机等。

四、路线图应用于重大项目安排

路线图作为一种项目规划工具,可以帮助确定重大项目需要的技术能力、资源分配、进程控制、时间节点等,制定严格规范的项目实施计划,从而确保各种资源在需要时可以及时获得。比如,在技术路线图领域,技术路线图用时间规划的方式将应用研究、开发实践和产品特色的需求结合起来,标明并重点关注最困难的技术问题,以及时开展有针对性的研发活动,检查并解决项目中最需要解决的问题。例如,2000 年 6 月,美国 Idaho 国家工程和环境实验室将技术路线图应用于支持具体项目的组织规划,取得了显著成效。该实验室与美国 Idaho 环境质量部就清理核反应堆实验遗留下来的废弃物项目达成协议,处理了 700 多辆坦克、未用过的装置以及含有放射性材料的遗留物。实验室应用了技术路线图方法分析工作要求,标明并对最困难的问题进行排序,然后及时开展研发活动,绘制出了废弃坦克特征路线图,成功地描述了 700 多辆废弃坦克的具体特征,大大方便了这些带有放射性危险物质的清除和处理。

五、路线图应用于其他领域

实践证明,路线图的应用范围十分广泛。目前,路线图不仅广泛应用于技术开发、工业生产,还应用于行业研究,如美国石油组织(API)于 2000 年绘制出了石油工业的技术路线图,描绘了 2020 年美国石油工业的情况。此外,路线图还可以应用于政府管理,如美国能源部环境管理办公室将技术线路图应用于环境管理,Brent Dixon 还提出了将科学技术路线图应用于环境管理的指导方法。路线图还渗入了人们的日常生活中,欧洲科学技术观测局(ESTO)2003 年一份报告中,就绘制出了与人们日常生活密切相关的住房供给、交通运输、购物和商业、教育和学习、

文化休闲和娱乐、健康等方面的技术路线图。

案例5　路线图方法在武器装备发展规划中的应用

武器装备需求论证与发展是指通过严密的科学方法和充分的论据对武器装备的设计、发展和管理等各方面对预定目标进行推理证明，以说明实现该目标的可行性、必要性及可行方案的过程。开展武器装备论证工作是使武器装备发展的科学性、实用性、协调性和系统性得以保证的必然要求，目前装备论证都是以高新技术装备为主要对象，论证水平将直接影响装备规划的制定和研制结果的有效性。

路线图在军事领域的应用非常有效。在1998年，美国海军的一个研究小组在罗伯特·叙里赫的召集下召开了一次产业技术路线图的研讨会，最早表明了军方对路线图的兴趣。近年来，美军在推进国防和军队建设中，大量运用了路线图的方法和理论，取得了显著的成效。据公开资料介绍，美国国防部及各军种先后制定了多种路线图，如《美国国防工业基础转型路线图》、《空间力量发展路线图》、《美军信息作战路线图》、《美国陆军转型路线图》、《美国空军转型路线图》、《美国海军转型路线图》，《美军无人机发展路线图》等。从实施和执行情况看，美军制定的这些路线图对推动美军的武器装备建设与发展，加速提升联合作战能力，产生了积极的推动作用。别的外军也纷纷把路线图的方法应用到军事领域中，比如，澳大利亚2007年发布的《网络中心战路线图》为澳军在2020年全面具备网络中心战提出了具体建设进度安排。

一、制定武器装备发展路线图的关键问题

武器装备发展路线图，是立足于武器装备建设现实，通过明确武器装备发展建设目标任务，设计武器装备建设体系框架，综合集成武器装备作战能力需求、关键技术、重大项目设置、资源预算投入等要素，细分任务类型，量化发展标准，明确实

现路径，把握时间节点，主要以图表形式对军队武器装备发展进行的总体设计。在制定武器装备发展路线图应特别注重把握以下几个问题：

（1）研究制定武器装备发展路线图，必须确立抓住战略机遇、加快发展的观念。目前，科技界对面向21世纪的科技发展趋势做出了重大判断，认为当今世界科技正处在革命性变革前夜，21世纪上半叶出现新的科技革命可能性较大。世界主要国家为抓住这一战略机遇都在积极准备，纷纷提出新的战略规划和路线图。2006年美国出台《美国竞争力计划》，欧盟发布《创建创新型欧洲》报告和《欧洲研究基础设施路线图规划》。2007年，日本政府发布《日本创新战略2025》和《日本技术战略路线图2007》等。面对世界科技发展和主要国家军队推动转型建设的大趋势，我们必须要有一种强烈的危机感、责任感和紧迫感，抓住机遇、迎接挑战，不失时机地推动武器装备建设科学发展。

（2）研究制定武器装备发展路线图，必须着眼于构建一体化作战体系。信息化条件下作战突出的特点就是体系对抗，构建基于信息系统的联合作战体系，已成为世界各国军队建设发展的核心任务。研究制定武器装备发展路线图，必须牢固树立和坚决贯彻体系建设思想，一切从有利于生成提高体系作战能力出发，科学设计和扎实推进武器装备发展。第一，要坚持突出重点。始终把握体系重心和发展重点，抓住处于核心和基础地位、起到关键和主导作用的重要环节，从技术突破、项目安排和资源配置等方面加以倾斜和聚焦，以重点突破带动整体跃升。第二，要注重解决问题。通过量化分析目标与现状的差距，准确定位能力建设的短板，从技术手段、体制机制和配套措施等方面寻求综合解决方案，提出具体解决办法，通过路线图的动态更新，不断追踪验证解决成效。第三，要强化综合集成。通过发展路线图把相关建设项目统筹好，选择科学的技术路径，确定合理的技术体制，推行规范的技术标准，把综合集成的着力点前置到顶层设计和总体控制上，确保纳入路线图安排的项目，能够有效支持建设目标和体系功能。

（3）研究制定武器装备建设发展路线图，必须抓住关键要素采取科学有效的方法。武器装备建设发展路线图，是衔接规划与计划的纽带，是沟通需求与技术的桥梁，也是在顶层上统筹资源配置的平台。因此，研究制定发展路线图，必须把握其本质要求，抓住其关键要素，着力在增强规划论证方法的科学性上下功夫。

第一步，要科学提出和论证军事需求。根据国家安全和发展战略，基于军队使命任务，研究提出联合作战能力需求，采取分层推导、逐级细化的方法，具体明确构成作战能力的基本要素和关键指标，注重定性与定量分析结合，以定量分析为主，准确反映基于目标和现状的能力建设要求。

第二步，要综合分析和优选技术路线。按照工程化要求科学选择技术路线，是发展路线图的主要功能和特色。着眼发挥重大工程的牵引带动作用，综合考虑作战体系的整体功能、关键技术的可能突破、环境条件的支撑程度和国情军情的实际情况，妥善处理现实性与前瞻性的关系，认真进行对比分析和多案选择，确保做出最佳筹划决策，力求实现效益最大化和风险最低化。

第三步，要统筹设计和确定发展途径。武器装备发展路线图，必须着眼于全局，面向长远，围绕基本目标，明确阶段性任务，合理设计发展步骤、发展重点和发展顺序，科学设置时间和进程调控节点，同时采取配套政策措施，确保武器装备建设健康、有序、快速发展。

（4）研究制定武器装备发展路线图，必须落实加强战略管理的要求。武器装备建设是一个复杂的系统工程，也是资源投入集中的重点领域，加强战略管理是确保军队信息化建设科学发展的必然要求。研究制定武器装备发展路线图，应突出抓好战略设计、战略实施、战略评价三个关键环节，充分发挥战略管理对于武器装备建设的促进和保证作用。

在战略设计上，要通过发展路线图，把宏观战略规划和具体实施计划衔接起来，构成完整的规划计划体系，解决需求与技术脱节问题。从量化分析能力需求入手，设计系统要素，优化体系架构，选择关键技术，安排重点项目，完善支撑环境，确定经济有效的发展路径。

在战略实施上，要把工程化推进、重点项目引领和支撑环境保障有机结合起来，将发展路线图的路径安排与规划计划的具体部署衔接起来，严格立项审查，加强过程管理，搞好节点调控，确保武器装备建设健康有序推进。

在战略评价上，要引入科学的评价模式和方法，健全评价机制，规范评价标准，重点对路线图的设计创新性、项目协调性和技术可行性，武器装备建设的进度和绩效，作战体系的融合度和整体功能，进行系统检查、综合验证和科学评价，及时反馈信息，加强协调指导，确保路线图的重大建设安排落到实处。

二、制定武器装备发展路线图的方法和思路

制定武器装备发展路线图主要采用定性分析和定量分析相结合的方法，使发展目标更加清晰；采用目标和现实对比分析的方法确定发展需求，使需求与建设发展实际结合更加紧密；采用优选关键技术和实现路径的方法，使建设项目的安排更加科学合理；采用图、表、文结合的表现形式，使规划内容更加简明直观，采用动态更新的方法，使定期修改的文本指导性、针对性更强。

武器装备发展路线图既包括对未来的预测，也包括对现实的认识；既包括对目标的确立，也包括对过程的设计；既包括宏观的预测，也包括对微观的前瞻；既包括对系统的分解，也包括对系统的综合；既包括图示的形式，也包括文本的融合，是战略管理的重要方法与手段，是提升战略管理能力的有效途径。

在整个军队武器装备发展路线图的制定过程中，为了保证路线图的制定质量，思路如图 7-2 所示。

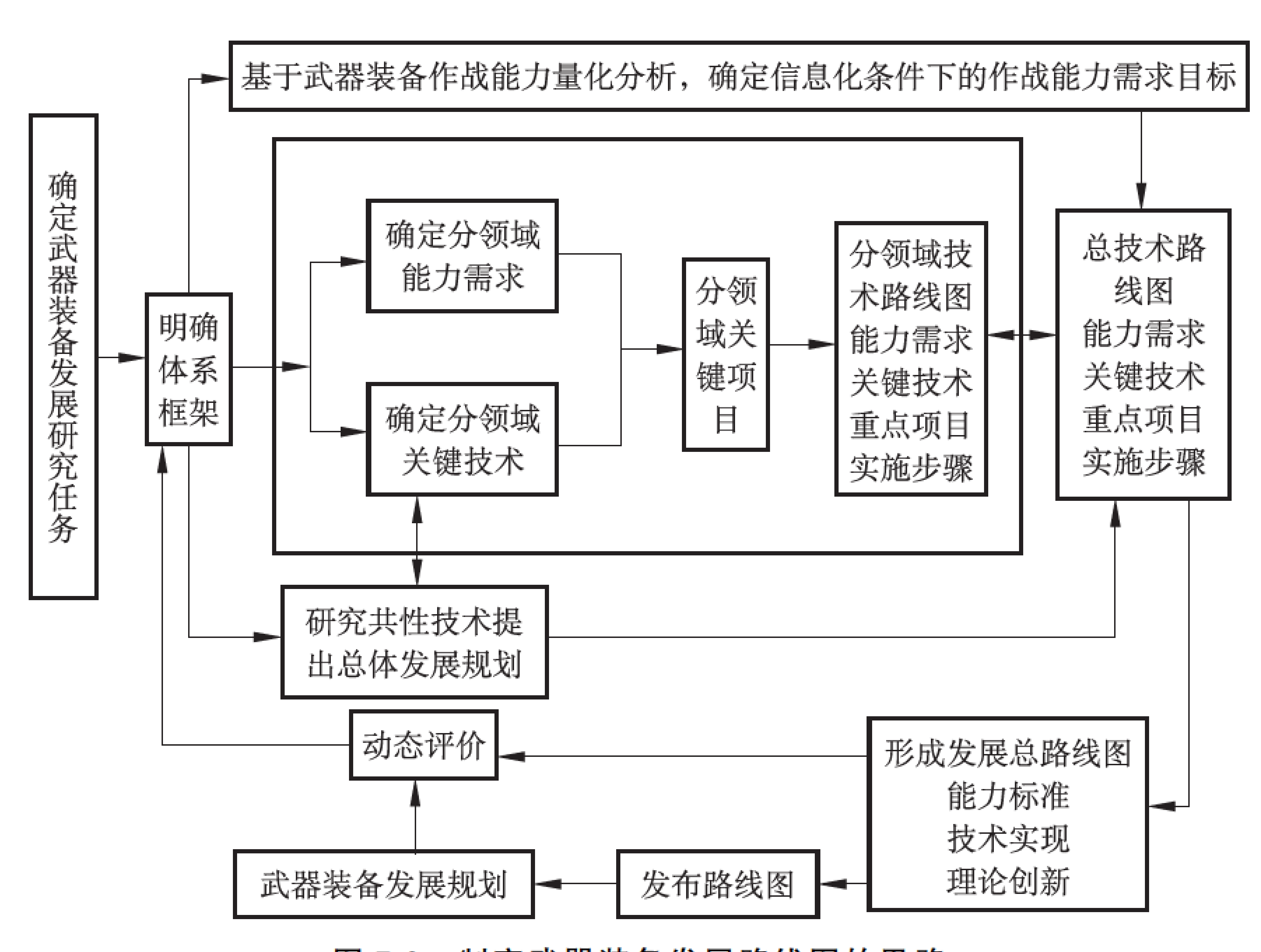


图 7-2　制定武器装备发展路线图的思路

从图 7-2 可以看出制定武器装备发展的路线图的基本思路是基于我军武器装备发展建设使命任务，根据前期建设成果，提出我军武器装备发展的总体指标和阶段性指标，通过分析武器装备发展发展现状与目标之间的差距，把制约我军武器装备发展的各个分领域的短板找出来，由此找到武器装备发展的关键技术；通过对关键技术与系统框架的关联性分析，提出支撑实现武器装备发展的各个分领域的重点建设项目，根据提出的重点建设项目，区分不同发展阶段，描述武器装备发展的路线图，最终形成文、图、表相结合的路线图，然后发布路线图，提出武器装备发展的措施建议以及实施方案；通过实施后，动态评价，再进行更新。

在武器装备发展路线图的制定过程中，需要众多相关领域的科技专家、决策者和技术成果使用者共同参与。因此，在整个组织过程中，需要用科学的方法将各个环节进行有效的联结，以便将众多的专家以及参与者的集体智慧凝练出来，达成共识。

运用路线图的方法统筹规划武器装备建设，是一个全新的课题，需要突破传统观念、创新发展思路、改变习惯做法，尤其在武器装备发展的战略目标，选择具有震慑意义的建设项目，选择关键技术、统筹重大项目等方面，必须进一步解放思想、集智攻关、凝聚共识，动态更新，才能使武器装备发展规划这项事关战略全局的顶层设计工作取得理想的效果。可以预期，采用路线图方法将会对武器装备需求论证与发展产生很大的促进作用。

第八章 基于网络科学的评价方法

网络在自然界和人类社会中无处不在,我们生活在一个充满着各种各样网络的世界中,网络已经成为当今时代生活中不可缺少的部分。网络科学是研究利用网络来描述物理、生物和社会现象,建立这些现象的预测模型的科学。从数学的角度上说,网络是由节点集合 $V=\{v_1, v_2, \cdots, v_n, \cdots\}$ 和边集合 $E=\{e_1, e_2, \cdots, e_m, \cdots\}$ 所组成的集合 $N=\{V, E\}$。网络是由许多抽象的节点和相互连线(边)所组成,节点表示复杂系统的单元(元素),依研究的对象而不同,节点之间的边表示单元之间的相互作用,可以各式各样。网络结构的基本属性是具有节点和连线(边)。节点是网络的基本元素,连线表示节点之间的连接关系。在不同应用领域中,节点和连线可以代表不同的事物及其相互之间的关系。例如,在社会网络中,节点代表普通人或社会岗位;在生物网络中,节点代表分子、基因或神经元;在信息网络中,节点代表网站的页面或某个作者发表的论著。连线可以代表朋友关系、业务往来关系、化学反应、网络链接地址及文献引用等。规模庞大的复杂网络系统由这些多种多样的节点和错综复杂的不同连接方式所组成,从世界上最大的互联网和万维网,到生命体的新陈代谢网和神经网络,从技术网到社会网,从物联网到经济网,丰富多彩,网络充满整个自然界和社会。虽然网络看上去并不神秘,但是其规律却十分奥妙,尽管人们已经揭开了它的部分面纱,但是更多的规律尚未完全揭示出来。

网络科学正是与众多学科和领域广泛交叉的一门新兴科学,它的诞生既适应

了现代网络信息时代的需要，又符合 21 世纪复杂性科学研究的大趋势。20 世纪 90 年代以来，由于计算机、互联网和高科技等科学技术的迅猛发展，不断完善的各种数据库，比以往任何时候人们能够更容易、快捷地获取所需的各种信息和资源，促使人类加速跨进了网络信息时代，人类生活和科学研究因此发生了巨大的历史性变化，各领域的科学家积极合作和充分利用人类已有的科学知识和高科技的成果，从理论和实证上深入探索网络科学的规律，推进各种复杂网络的广泛应用，这已经成为该领域研究和发展的强大推动力。

第一节　网络科学理论发展的三个时期

一、规则网络理论时期

追溯网络科学发展的足迹，规则网络理论的发展首先得益于图论和拓扑学等应用数学的发展。图论起源于著名的哥尼斯堡七桥问题。哥尼斯堡是东普鲁士的首都，普莱格尔河横贯其中。18 世纪这条河上建有七座桥，将河中间的两个岛和河岸连接起来。有人提出：能不能每座桥都只走一遍，最后又回到原来的位置？1736 年，有人带着这个问题找到了当时的大数学家欧拉。欧拉首先把这个问题简化，他把两座小岛和河的两岸分别看作四个点，而把七座桥看作这四个点之间的连线，欧拉的研究开创了“图论”这门新的数学分支，因此，这是第一代科学家对网络科学的开创性贡献。问题是要从这四块陆地中任何一块开始，通过每一座桥正好一次，再回到起点。欧拉在 1736 年解决了这个问题。他用抽象分析法将这个问题化为第一个图论问题，即把每一块陆地用一个点来代替，将每一座桥用连接相应的两个点的一条线来代替，从而相当于得到一个图，也就是一个网络。欧拉得出结论——不可能每座桥都走一遍，最后回到原来的位置。并且推广了这个问题，成为欧拉回路，即要在图中找到一条经过每条边一次且仅一次的路。欧拉给出了对于一个给定的图可以某种方式走遍的判定法则：图中无奇点或者恰有两个奇点。这

项工作使欧拉成为图论及拓扑学的创始人。

1859 年,英国数学家哈密顿发明了一种游戏:用一个规则的实心十二面体,它的 20 个节点标出世界著名的 20 个城市,要求游戏者找一条沿着各边通过每个节点刚好一次的闭回路,即绕行世界一周。用图论的语言来说,游戏的目的是在十二面体的图中找出一个生成圈。这个问题后来就叫作哈密顿问题。哈密顿回路是要在图中找到一条经过每个点一次且仅一次的路。而著名的“货郎担问题”则是一个带权的哈密顿回路问题。由于运筹学、计算机科学和编码理论中的很多问题都可以转化为哈密顿问题,从而引起国际上广泛的注意和研究。

在图论的历史中,还有一个最著名的问题——四色猜想:每幅地图都可以用四种颜色着色,使得有共同边界的国家都着上不同的颜色。图论的第一本专著是匈牙利数学家 O. Koning 于 1936 年写的《有限图与无限图的理论》。

中国的管梅谷在 1962 年提出了中国邮路问题:一个邮递员从邮局出发要走遍他负责的每条街道去送信,问应如何选择路线可使所走的总路程最短。

在图论中,解决最短路问题的 Dijkstra 算法和 Floyd 算法、解决网络中带负权的边的逐次逼近算法,网络最大流问题算法、网络最小费用最大流问题算法等都得到极为广泛的应用。

用图论的语言和符号可以精确、简洁地描述各种网络,图论不仅为数学家和物理学家提供了描述网络的共同语言和研究平台,而且至今图论的许多研究思想、技巧、成果和结论仍然能够自然地被移植到现在复杂网络的研究中,成为一种有力的研究方法和工具。到目前为止,规则网络理论已经被广泛应用于管理科学、计算机科学、信息论、控制论、物理、化学、生物学、心理学等各个领域。

二、随机网络理论时期

匈牙利数学家 Erdö 和 Rényi 在 1959 年提出了随机网络理论。他们在构造随机网络时采用一个概率来决定两个节点之间是否连边。通过在网络节点间随机地连接边,就可以有效地模拟通信和生命科学中的网络系统。该理论认为尽管连接是随机的,但由此形成的网络却是高度民主的,即绝大部分节点连线数目大致相同,节点连线数分布为钟形的泊松分布。Erdös 和 Rényi 提出的随机网络是被人们

研究最多的网络模型。它通过节点随机地与其他节点连接来生成网络。该网络提供了一种重要的网络建模参考框架。虽然并没有一种真实网络符合这种模型，但是它的许多特性都可以精确计算，它是研究真实网络的一种重要理论工具，并且能提出一系列假设供人们检验。

在1960年以后的近40年里，这种随机网络理论被公认为是正确认识真实网络的理论，它推动了图论复兴，促进了网络理论发展。使用的定量方法主要是随机理论。

三、复杂网络、网络科学理论时期

在20世纪即将结束的年代，面对动态发展的互联网和万维网，还有其他各种社会网络、生物网络、物理网络，一些科学家发现已无法用上述两种网络理论来解释它们结构和演化的一些新问题，他们粗略地称这类网络为“复杂网络”。Boccara给出了复杂网络的一种定义：如果某些网络组成部分表现的行为已被了解，但是由于缺乏足够的科学知识而无法预测这些网络整体的行为，则称其为复杂网络。了解和控制现实中的复杂网络需要利用网络科学的理论和方法。

最近几年来，无尺度网络模型成为人们关注较多的网络模型，它代表了网络理论研究的新进展，激起人们对于真实网络研究的极大兴趣。有若干模型可用于生成无尺度网络，其中应用较多的是Barabasi和Albert于1999年提出的BA模型，它的基本原理是“增长”(growth)和“择优连接”(preferential attachment)。另外，还出现了基于模仿(拷贝)及优化等原理的新模型。这些新模型在复杂网络理论研究中也起了重要的作用。Watts和Strogatz于1998年提出的介于规则网络和随机网络之间的小世界网络模型，同样具有重要的理论和实际意义。

以上取得的突破性研究成果，引起了国际和国内学术界的广泛关注，掀起了复杂网络理论和应用研究的高潮。现在，有代表性的复杂网络主要是无尺度网络与小世界网络，同时还出现了一些新型复杂网络。21世纪开始后，又出现了网络科学研究的热潮，人们开始从新的高度和广度来研究复杂网络。

1. 网络科学的基本概念和网络应用中的网络特性

为了刻画网络科学的全面性质，科学家已经提出了网络科学的许多基本概念、

特征量和度量方法,用于表示网络的拓扑结构特性和动力学性质。主要包括:节点、边、度、权、谱、子图;直径、距离、路径长度、平均路径长度;节点度分布、强度分布和边权分布、介数及其分布;群聚系数、相称性系数、群聚度关联性、模块性、强关系、弱关系、自组织性等。

在网络科学的应用中,各个领域的专家都非常关注网络科学需要共同研究的六个网络特性:网络特征提取、网络费用、网络有效性、网络演化、网络恢复性及网络测量性。图 8-1 给出了网络科学的基本概念和网络应用的特性。

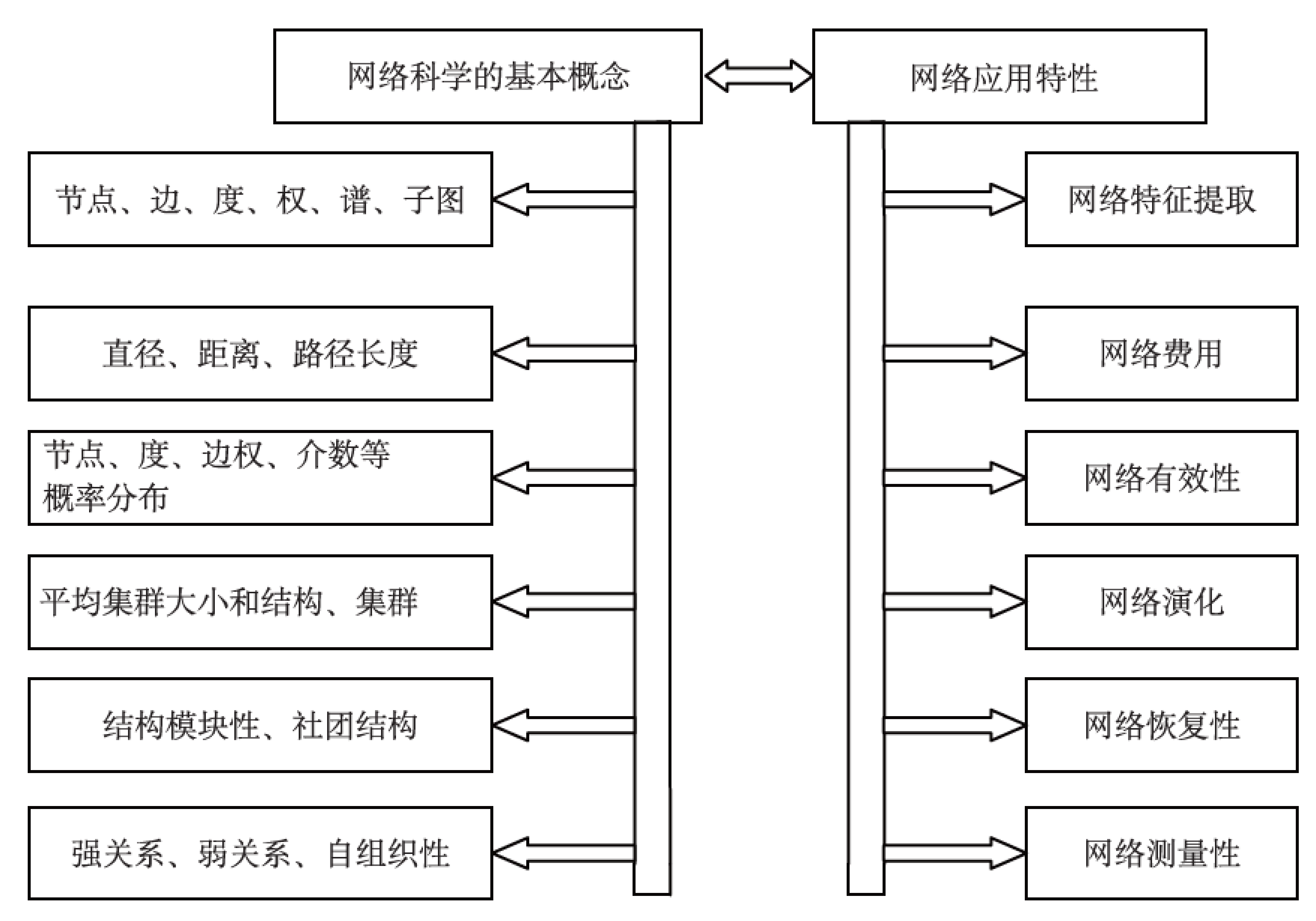


图 8-1　网络科学的基本概念和网络应用特性

2. 网络科学的主要研究内容和理论基础

网络科学应该是专门研究网络系统的定性和定量规律的一门崭新的交叉科学,研究涉及网络的各种拓扑结构及其性质,与动力学特性(或功能)之间相互关系,包括网络上各种动力学行为和信息的传播、预测与控制,以及工程实际所需的网络设计原理及其应用研究,其交叉研究内容十分广泛而丰富。网络科学,不仅用数学上图论的语言、符号和理论来精确而简洁地描述,而且以统计物理等诸多现代科学为理论基础。概括地说,网络科学的核心内容是结构(连接路径,结构也可能

是动态的结构）和动力学（节点之间的交换和相互作用，或者说是互动）。一般网络科学具有如下几个主要研究内容：

（1）网络的节点各种各样，取决于具体研究对象，特别是涉及非线性的动态演化；节点之间的相互作用错综复杂，体现在权重多样性和结构的非均匀性，连接可以是稀疏的。网络结构及其拓扑特性是首要的研究内容。

（2）网络结构具有复杂性和多样性。大多数现实世界网络结构，既非完全规则，也非完全随机，而是随机性与确定性的混合结构，需要研究复杂网络的特殊性和普适性。

（3）有的网络规模大，节点数量多。网络的行为特性需要采用统计方法研究。

（4）网络具有时空复杂性，可以是静态的，而通常复杂网络是动态的演化，在网络生长和演化的整个过程中一方面网络的节点不断增加着，另一方面节点之间的连接方式和权重在不断变化，网络的拓扑特性和动力学性质随时空进行着复杂演化，需要研究网络系统的交互行为。

（5）有的网络存在不同的层次，需要研究网络不同层次的规律。

网络科学由于其广泛交叉性和复杂性，涉及众多学科的知识和理论基础，特别是数学、统计物理学、计算机与信息科学、非线性科学、复杂性科学、系统科学和现代控制理论等。图 8-2 给出网络科学涉及的相关理论基础。

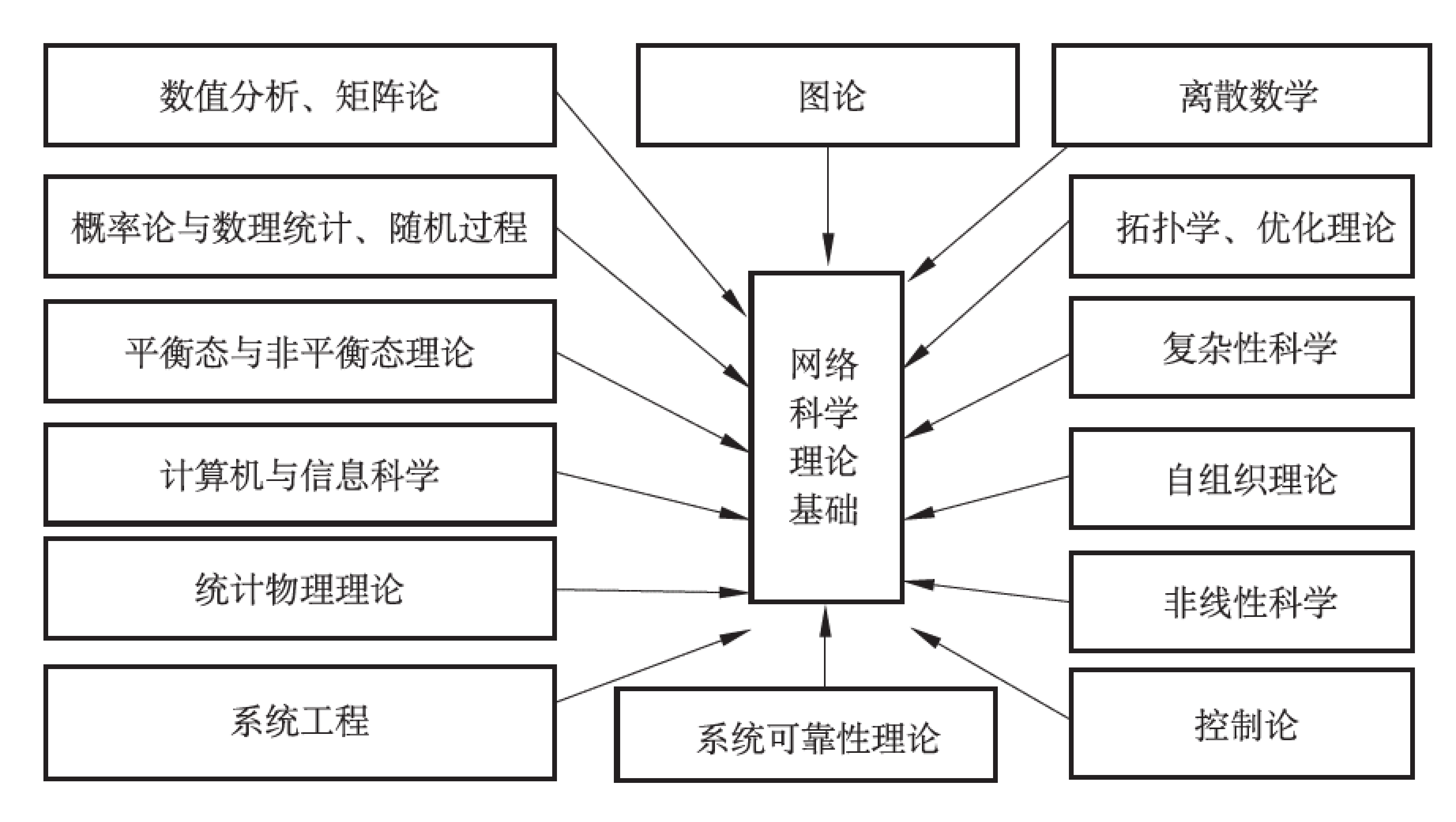


图 8-2　网络科学的相关理论基础

3. 网络科学模型及相关的分析方法和工具

美国科学家 L. V. Bertalanffy 曾指出，每一门科学在广泛的含义上都可以看作是建立模型。网络科学是研究利用网络来描述物理、生物和社会现象并建立这些现象预测模型的科学。模型是网络科学最常见的研究课题之一。网络科学中使用最多的是数学模型。网络模型是对真实网络适当简化后，用适当的表现形式把它的主要特征描绘出来所得到的。网络模型的结构与真实网络可以有所不同，但是应能用数学语言描述、用数学方法分析和解决真实网络问题。

研究网络需要采用多种分析方法，还需要研制适于各种学科研究和应用的工具。规则网络模型采用图论、组合数学、优化理论等；随机网络模型采用的方法包括图论、组合数学、概率论及随机过程。目前，采用平均场方法、变化率方程、主方程和生成函数等方法，能够定量分析并预测无尺度网络的度分布和其他特性变化。对于各种不同类型的网络，采用精确算法、动态系统理论、渗流理论可以取得定量分析结果。采用优化方法和遗传算法则可以生成优化的网络。为了研究网络中的节点集群，科学家们采用了多学科交叉的方法。图 8-3 列举了常用的网络科学模型、分析方法和工具。

4. 网络科学的发展趋势和应用前景

由于国际上网络规律的重大发现，即小世界现象和无尺度特性的发现，极大地激起了人们对网络科学的研究兴趣。人们已经从不同领域多角度、多领域展开了对网络的研究，无论是理论模型探索，还是真实世界网络的实证研究。综合来看，网络科学的若干个重点研究课题以及可能的发展趋势包括以下内容：网络的动力学、特殊状态定位及信息传播；大规模网络的建模和分析；网络设计和集成；提高网络科学的数学严密性和数学基础；抽象出各领域共同的基本概念；提供更好的网络实验和测量方法；网络的健壮性和安全性；用形式化方法对网络进行分类；用统计学分布方法研究复杂网络结构和分类；为何大多数网络具有模块结构；网络动态过程的基本概念和特性；网络动态过程对拓扑结构的影响；生物网络进化机制对拓扑结构的影响；定量分析不同网络之间的作用；研制新型工具，系统地研究大型网络的系统可靠性；研究小网络分类及特性；为何社会网络倾向于更多连接，生物网络

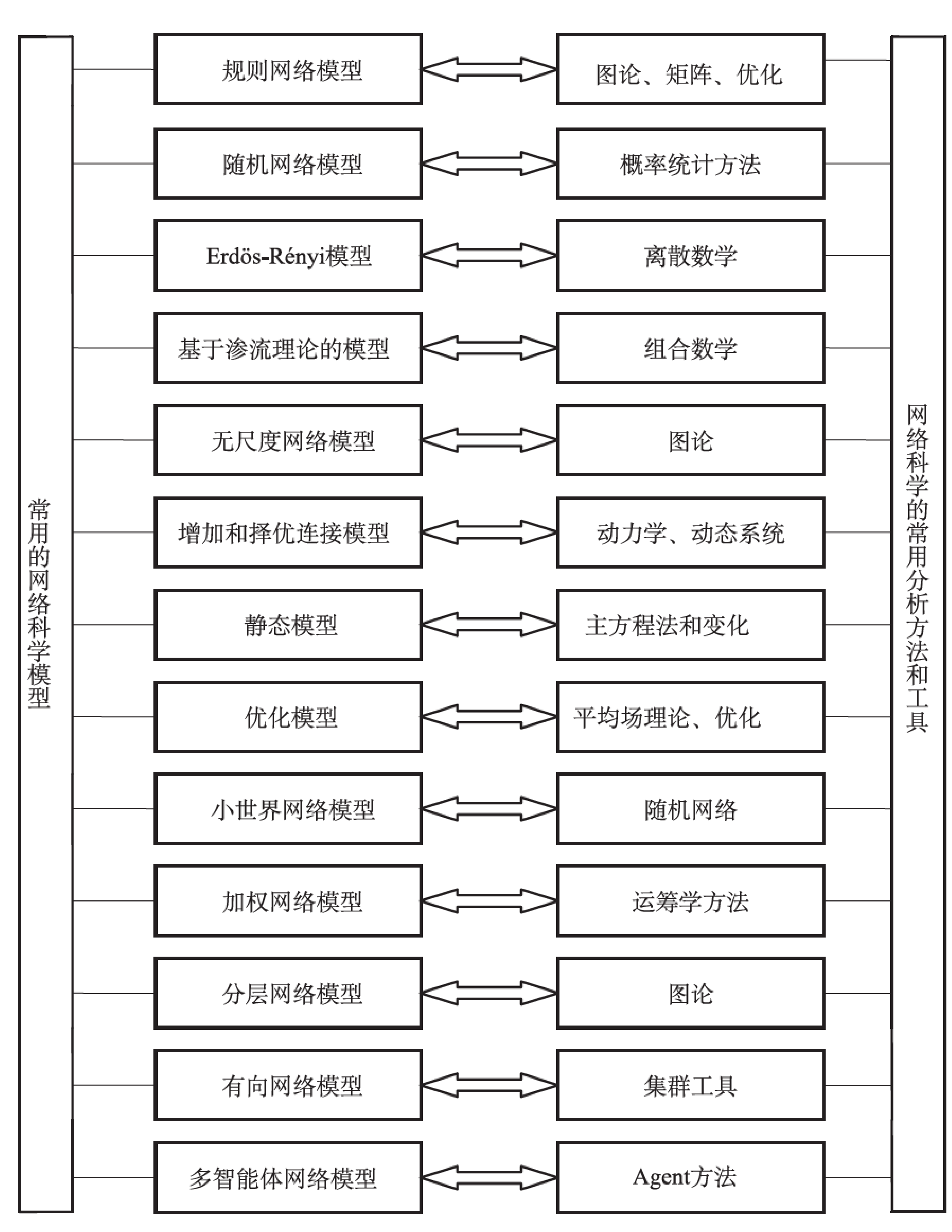


图 8-3　常用的网络科学模型、分析方法和工具

和技术网络却倾向于更少连接等。

网络科学的应用领域涉及军事、经济、通信、工程技术、社会、政治、经济和管理

等众多领域。小世界效应、无尺度网络等发现极大地改变和丰富了人们对复杂世界的认识，揭示了前所未有的理论和技术问题，不仅适用于自然网络，而且适用于人造网络，无论对自然界还是对人类社会，都具有应用价值。网络科学已经引起了国内外不同学科的高度重视和密切关注，已成为极富有挑战性的前沿课题之一，正在国内外蓬勃开展，发展迅猛，具有广泛而深刻的理论意义和发展前景。

案例6　赛博空间的目标选择与打击评价方法

一、赛博空间简介

现代信息化战争以网络中心战的作战理论彻底改变了以往以平台为中心的作战理论，带来了军事斗争的转型。新技术的发展产生了赛博空间（Cyber space）和赛博战（Cyber Warfare）的新概念。赛博空间最早起源于哲学和计算机领域的抽象概念，一般是指计算机和计算机网络的虚拟现实，如今赛博空间的抽象概念已经大大扩展。

2009年3月《美国空军赛博司令部战略构想》定义：赛博空间是一个物理域，这个域通过网络系统和相关的物理基础设施，使用电子和电磁频谱来存储、修改或交换数据，主要由电磁频谱、电子域系统及网络化基础设施三部分组成。《美国国防部军事术语辞典》指出：赛博空间是信息环境内的全球领域，由相互依赖的信息技术基础设施网络组成，包括互联网、电信网、计算机系统以及嵌入式处理器和控制器等。因此，赛博空间并不等于网络空间，而是既包括电磁空间、网络空间及其扩展和延伸的抽象空间，也包括相关基础设施的物理空间及包括人参与的虚拟环境。

根据赛博空间的概念和内涵，赛博空间可以理解为是继陆、海、空、天后的第五维空间，而这维空间又是渗透于陆、海、空、天而存在，并起到中枢神经的统领作用。

作战行动所依赖的物质条件和客观环境的改变推动着新的作战理论的产生。

一方面，随着信息技术的快速发展，社会一体化程度和信息依赖程度空前提高；另一方面，随着信息技术广泛应用于军事领域，作战力量灵敏感知、快速反应、远程机动、精确打击等能力迅速提升。这些现象都昭示着在信息时代，作战的主要领域将发生改变，作战的主要手段将发生变化，而作为作战筹划的首要活动和核心内容的目标选择与打击理论也将发生重大变化。早在 1997 年，P. K. Singh 少校在 *Maneuver Warfare in Cyberspace* 一文中就提出将五环目标选择模型运用到赛博空间作战中。2011 年，S. J. Smart 少校就撰文研究赛博空间目标选择与打击的一般性与特殊性，探讨了赛博空间的目标选择与打击需要注意的问题。2013 年 1 月，美军新颁布的联合目标选择与打击条令 JP 3-60Joint Targeting 首次在联合目标选择与打击支援任务中加入美军赛博司令部的角色和遂行联合目标选择与打击任务时进行赛博空间战斗的论述。研究发展切合我军实际、适合我军作战对象的赛博空间目标选择与打击模型迫在眉睫。

二、赛博空间的目标选择方法设想

2014 年 1 月新修订的 JP 1-02DoD Dictionary of Military and Associated Terms 中将赛博空间定义为：处在由包括信息技术基础设施和常驻数据的相互依赖的网络组成的信息环境中的全球域，包括互联网、无线电通信网络、计算机系统、嵌入的处理器和控制器。赛博空间的目标体系是由许多网络节点和这些节点间的链路组成的复杂结构，如图 8-4 所示。

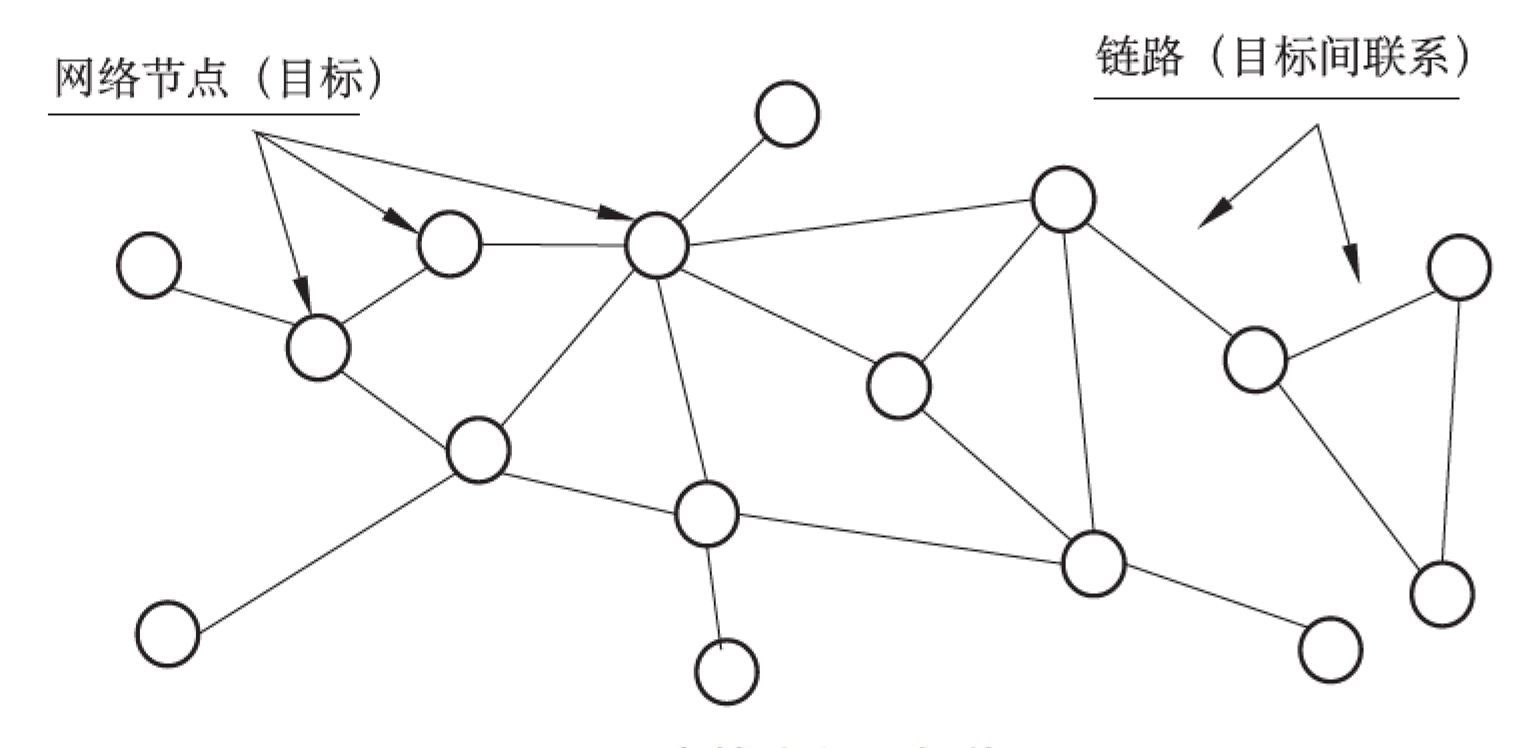


图 8-4　赛博空间目标体系

基于赛博空间的网络化特性，从研究网络入手，探寻赛博空间的作战重心。

1. 赛博空间目标体系特点分析

（1）全频谱整体性。在赛博作战中，所有信息系统都处于赛博攻击的阴影之下，呈现了“全频谱整体作战”的特征。即使众多指挥控制网络和联勤保障网络并不直接与互联网相连，仍可以使用电磁武器进入或实施攻击，以窃取情报和破坏敌作战、保障网络。另外，一场战争的胜负并不取决于某个局部，而取决于战争的整体效果，因此，在作战筹划阶段要有宏观的规划。

（2）无尺度性。由于每次作战任务和规模的限制，信息流与控制流的转移途径较短，在小范围内交互性频繁，大范围主要通过“转发节点”沟通。以互联网为例，体系内部只有少数的“集散节点”拥有大量的连接，大部分节点拥有的连接数目并不多，这正是无尺度网络（scale-free network ）的特征，而无尺度网络的重要特性就在于它可以承受随机的攻击，但面对协同式攻击却很脆弱，这正是我们设计的赛博空间目标选择与打击模型的突破口。

（3）复杂性。战争系统是典型的复杂巨系统，其核心是战争体系之间的对抗，在战争研究中遇到的很多问题，一般都与战争复杂性有关，在赛博空间中具体体现为目标体系具有很强的鲁棒性。传统的“斩首”模式对目标体系很难产生影响，因此需要对打击方案的打击效果进行精确的预估，确定最优的打击计划。

（4）对抗性。面对来自赛博空间攻击，这些信息系统的开发者和使用者也在不断研究运用赛博反制措施和弹性技术来保证在这种恶劣环境下作战，以确保任务的完成，在这一攻一防之间，也体现了“博弈”的特征。

2. 赛博空间目标选择与打击的建模设想

通过以上对赛博空间目标体系特点的分析，我们试图实现以下设想：

（1）分析赛博空间目标间联系，实现目标体系的可视化。赛博空间态势瞬息万变，若敌采用复杂的通信密码，我方未必能在短时间内破译。然而在赛博空间作战中，作战单元之间主要通过网络联系，网络通信痕迹不难追踪，通过网络监听技术监听敌网络通信，基于通信痕迹快速勾勒出赛博空间目标间关系，画出赛博空间

目标间关系图，从整体上把握目标体系的关系网。

（2）分析目标体系的中心度，基于中心度制定备选的目标打击方案。通过目标体系的可视化对赛博空间目标体系有宏观的了解之后，依据目标体系的中心度排序识别目标体系中的“集散节点”，对几个“集散节点”发动协同式攻击。

（3）分析目标体系的演化，预估各个打击方案的毁伤效果。赛博空间目标体系鲁棒性较高，通常摧毁一个甚至多个重要目标都不会伤其筋骨，为了确保能够得到理想的攻击效果，需要对每一种打击方案进行推演，走一步算三步，通过建立评价函数，精确评价不同打击方案对目标体系的毁伤程度，计算以哪种打击方案能够较快破击敌作战体系，击溃其作战意志。

综上所述，得到目标体系分析与目标选择的流程框架，如图 8-5 所示。

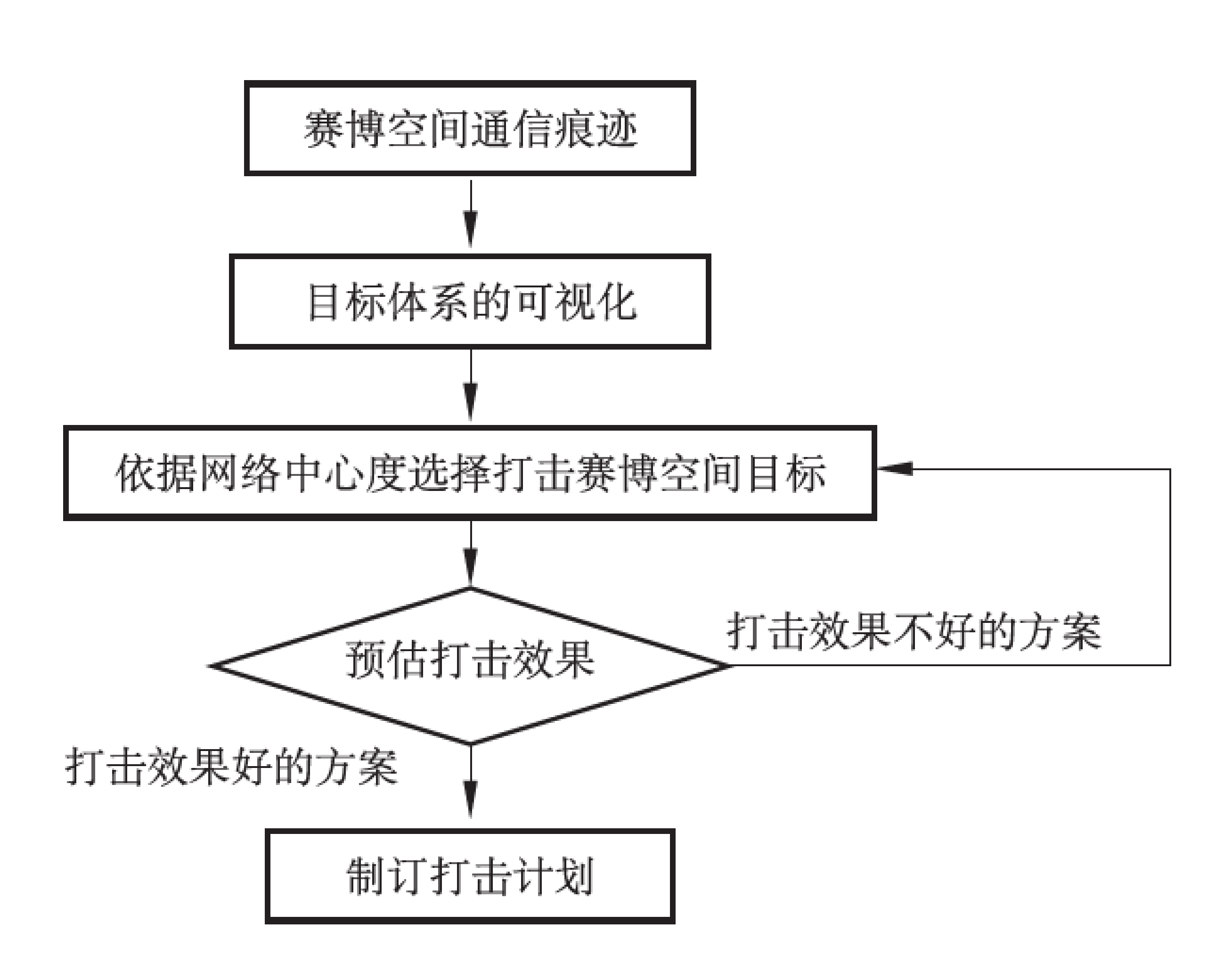


图 8-5　目标体系分析与目标选择流程框架

通过对目标打击方法的建模与目标打击方案的推演，确保制订的打击计划切实可行。

三、赛博空间的目标选择与打击模型的设计

赛博空间的目标选择与打击模型主要包括两个部分：基于中心度制定备选的

目标打击方案和打击方案效果预估。

1. 基于中心度制定备选的目标打击方案

目标的中心度是衡量目标在体系中是否处于重要地位、是否发挥关键作用的主要标度。其评判标准是该目标与其他目标是否具有大量、有效的联系。考察目标的中心度时主要通过点度中心度(衡量节点与其他节点的发展关系的能力)、接近中心度(衡量节点与其他节点的接近性程度)、中介中心度(衡量节点对资源控制的程度)、特征向量中心度(衡量节点与居于网络中心位置的节点的关系)来研究目标体系的特性。

在具有 n 个目标的体系 S 中,$d(x)$表示第 x 个节点的度数,即与其连接的其他节点数;d_{xy} 表示节点 x 与 y 之间的最短距离;$g_{jk}(x)$表示节点 j 和 k 间包含节点 x 的最短路径数;g_{jk} 表示节点 j 和 k 间的最短路径数;$\sum_{j<k}\frac{g_{jk}(x)}{g_{jk}}$ 表示 x 处于目标体系中两目标间最短路径的概率(以频率逼近);λ 为体系 S 的邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的主特征值,$\boldsymbol{e}=(e_1,e_2,\cdots)$为 λ 对应的特征向量,a_{ij} 为目标 i 对目标 j 的中心度的贡献,则有中心度的度量公式如表 8-1 所示。

表 8-1 中心度度量公式

点度中心度	接近中心度	中介中心度	特征向量中心度
$C_D(x)=\frac{d(x)}{n-1}$	$C_C(x)=\frac{n-1}{\frac{n-1}{\sum_{y=1}^{n}}d(xy)}$	$C_B(x)=\frac{2\sum_{j<k}\frac{g_{jk}(x)}{n^2-3n+2}}{n^2-3n+2}$	$C_E(x)=\frac{\sum_{j=1}^{n}a_{ij}e_j}{\lambda}$

注:所有中心度都采取标准化值。

这样,分别按照以上四个中心度对所有目标由大到小排序,便可以制定出四个备选的目标打击方案。

2. 打击方案效果评价

受目标中心战“通过对关键目标施加影响,削弱敌作战体系原有的‘聚合力和一致性’,从而达到控制、摧毁和压制敌方的目的”的战法理念启发,我们提出利用体系中心势与体系网络效率两个指标来评价目标体系的网络安全脆弱性和目标间

联络能力。

(1) 基于体系中心势的网络安全脆弱性评价

2003 年 2 月白宫颁布的 *The National Strategy to Secure Cyberspace* 明确了“脆弱性是网络安全的最大威胁因素,制定降低国家网络安全威胁及其脆弱性的计划是保护网络安全的重点任务”。中心势表征整个目标体系的中心化程度,用于衡量整个目标体系的联通情况对少数关键目标的依赖程度,我们选择中心势来评价网络安全的脆弱性,其计算公式为

$$C_G(S)=\frac{\sum\limits_{x\in S}(C_C^*-C_C)}{(n-1)\max(C_G^*-1)} \tag{1}$$

式中,C 为目标 i 的某类中心度值;C_G^* 为中心度最大节点的中心度值。

其中具体对应于点度中心度、接近中心度和中介中心度,其中心势的计算式又可简化如表 8-2 所示。

表 8-2　中心度度量公式

点度中心势	接近中心势	中介中心势
$C_D(S)=\frac{\sum\limits_{x\in S}(C_D^*-C_D(t))}{n^2-3n+2}$	$C_C(S)=\frac{\sum\limits_{x\in S}(C_C^*-C_C(t))}{(n^2-3n+2)/(2n-3)}$	$C_B(S)=\frac{\sum\limits_{x\in S}(C_B^*-C_B(i))}{n^3-4n^2+5n-2}$

体系中心势越高,说明整个目标体系的联通情况对少数关键目标(集散节点)的依赖程度越高,网络里“集群现象”明显,出现“一荣俱荣,一损皆损”的豪赌局面,网络安全就越脆弱;相反,中心势越低,目标体系中的关键目标就不明显,网络抗打击能力更强。

(2) 基于体系网络效率的目标间联络能力评价

打击方案效果评价的另一方面是评价目标之间联系是否紧密,目标间联络能力如何。它可以通过网络效率来衡量。

Paolo Crucitti 在 *Efficiency of Scale-free Networks: Error and Attack Tolerance* 一文中提出网络效率的计算公式:

$$E_{\text{glob}}(S)=\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=j\in S}\frac{1}{d_{ij}} \tag{2}$$

式中,d_{ij} 为节点 i 与 j 之间的最短路径长;k_{ij} 表示从节点 i 到 j 经过的最少节点数;

$d_{ij}=k_{ij}+1$，n 为体系的节点数。

但该公式未考虑点与点之间的联系与两个点的中心度有关，因此我们提出了改进的网络效率计算公式：

$$E_{\text{glob}}(S)=\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=j\in S}\frac{\min\{C_G(i)/C_G(j),C_G(j)/C_G(i)\}}{d_{ij}} \qquad (3)$$

当两个节点直接相连时，$d_{ij}=1$；

当两个节点无法找到连接对方的路径时，$d_{ij}=\infty$。

当 $C_G(1)=C_G(2)=\cdots=C_G(n)$ 且 $d_{ij}=1$ 时，

$$\min\{G_C(i)/C_G(j),C_G(j)/C\}=1$$

$$E_{\text{glab}}(S)=1$$

此时体系中任意两个目标都建立了联系，目标间联络能力无疑是最好的。

当

$$C_D(1)=1,C_D(2)=\cdots=C_D(n),$$

$$d_{ij}=\begin{cases}1,i=1\text{ 或 }j\\ \infty,i\neq 1\text{ 且 }j\end{cases}$$

有

$$E_{\text{glab}}(S)=\frac{1}{n(n-1)}$$

此时体系中存在一个目标与其他所有目标都有联系，而其他目标之间没有联系，目标间联络能力很小。如果再打掉目标 1，那么体系中各个点就相互孤立，$E_{\text{glab}}(S)=0$。

这样，E_{glc}就可以衡量体系内目标联系的密切程度。网络效率高，说明体系内目标联系密切，目标之间的信息共享活动多、行动协作性强。

至此，我们便可通过体系中心势与体系网络效率两个指标评价赛博空间目标体系的状态。

（3）基于体系中心势和体系网络效率的打击效果评价

通过中心度指标可以确定出目标体系的相应关键目标，然而由于不同中心度关注的方面不同，依据不同中心度确定的打击目标排序存在着一定的差别。那么采用哪种中心度能够更准确地选择关键目标？

为了选取适用于制定打击方案的目标中心度指标，按照不同中心度的排序对

目标体系进行攻击实验，即删除中心度最大的目标及其与其他目标的联系，再通过观察体系中心势和网络效率的变化评价此方案对目标体系的毁伤效果。我们提出评价打击方案的体系毁伤效果的公式：

$$H_G = \sum_k \frac{C_G(i)}{\sum_{j=1}^{k} C_G(j)} \cdot \frac{H_G(S) - H_G(i)}{H_G(S)} \tag{4}$$

式中，$H_G(S)$为采取某一中心度计算的原先体系中心势C或网络效率E；$H_G(i)$为打击目标i后体系中心势C或网络效率E；k为测试某一打击方案时打击的目标数。

当$H_G(S)$代表体系中心势C时，式(4)的意义在于评价依据某一中心度打击目标对体系中心势的影响，即对其网络安全性的打击效果；当$H_G(S)$代表网络效率E时，式(4)的意义在于评价依据某一中心度打击目标对体系网络效率的影响，即对其联络能力的打击效果。

四、模拟数据检验

下面为我们通过模拟一个对敌战术数据链进行监听得到14个目标之间的通信痕迹来阐释赛博空间目标选择与打击模型。

（一）由中心度选择关键目标

计算14个目标的中心度，如表8-3所示。

表8-3　各目标的中心度　　%

目标	点度中心度	接近中心度	中介中心度	特征向量中心度
T_1	53.846	65	0.791	34.342
T_2	46.154	61.905	0.534	29.893
T_3	61.538	72.222	**12.251**	33.591
T_4	**76.923**	**81.25**	**8.612**	43.684
T_5	69.231	76.471	5.3	41.119
T_6	69.231	76.471	4.758	41.384
T_7	69.231	72.222	1.627	**43.777**
T_8	38.462	61.905	3.767	19.473

续表

目标	点度中心度	接近中心度	中介中心度	特征向量中心度
T_9	15.385	44.828	0	6.225
T_{10}	69.231	76.471	3.94	41.511
T_{11}	69.231	72.222	2.353	42.329
T_{12}	53.846	65	0.504	35.854
T_{13}	**84.615**	**86.667**	5.02	**50.442**
T_{14}	69.231	76.471	3.106	42.519

依据 4 个不同的中心度我们可制定 4 个备选的打击方案(先打两个目标),若依据点度中心度或接近中心度制定打击方案,应该先打击 T_{13} 和 T_4;若依据中介中心度制定打击方案,应该先打击 T_3 和 T_4;若依据特征向量中心度制定打击方案,应该先打击 T_{13} 和 T_7。各打击方案执行后目标体系的状态如图 8-6 所示。

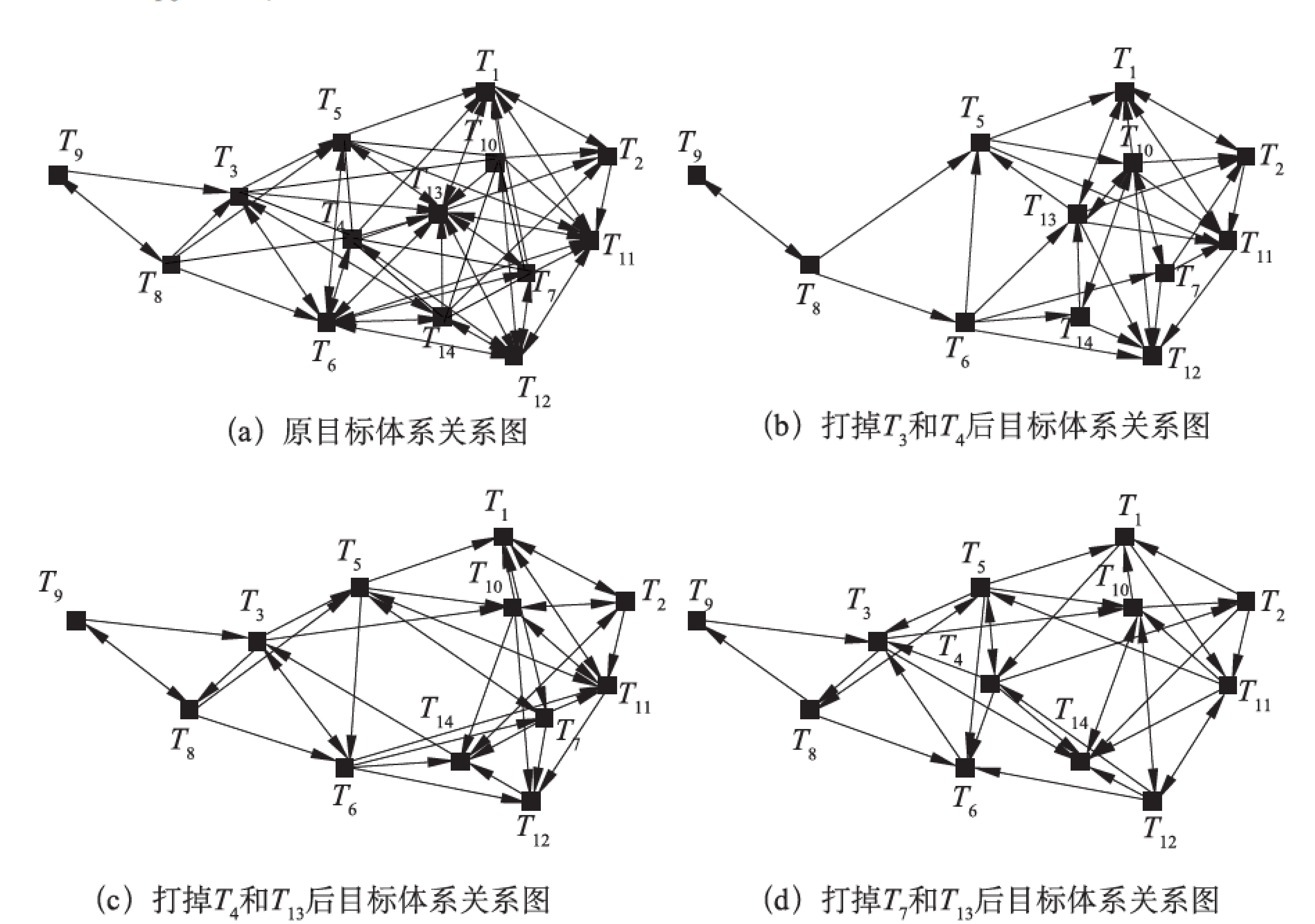


图 8-6　依据中心度制定打击方案

（二）综合评价打击方案的体系毁伤效果

由于图 8-6 并不能让人一眼就看出各个打击方案的好坏，我们需要从体系中心势和体系网络效率两方面对方案的体系打击效果进行细致的比较，如表 8-4 所示。

表 8-4　打击方案对体系中心势和体系网络效率的影响

打击方案	选择的目标	对应中心势增加度	体系网络效率下降度
依据点度中心度选择目标	T_{13}、T_4	−0.0037	0.0494
依据接近中心度选择目标	T_{13}、T_4	−0.0921	0.0342
依据中介中心度选择目标	T_3、T_4	0.6008	0.1136
依据特征向量中心度选择目标	T_{13}、T_7	−0.0920	0.0114

通过比较我们发现在这个模型中依据中介中心度选择关键打击目标的方案对中心势的增加和体系网络效率的降低效果都是最明显的。因此，这个方案在增加目标体系的网络安全脆弱性、削弱目标间联络能力上效果最好，应该选择这种方案。

五、结束语

只要有实质性的军事对抗，就有目标的选择与打击。赛博空间作为一个重要的作战空间，有着其特殊性和一般性。研究符合其特点的目标选择与打击方法很有必要。

本案例通过赛博空间的特点进行分析，提出赛博空间目标选择与打击的设想，建立目标选择与打击的分析框架，在这个框架下设计了具体的目标选择方法与打击效果预估函数。通过模拟数据检验，这种目标选择与打击思想克服了传统目标选择粗放的缺点，可以在复杂的战场空间中精选关键目标，制定最佳的目标打击计划。

当然，本案例还存在一些问题，如所研究的目标选择与打击还局限于单方面的选择与打击，未考虑敌我双方的博弈对抗，这也是我们正在探索的一个领域。

第九章 基于指数法的装备体系作战能力评价

当前研究部队作战能力的量化方法主要采用"指数方法"(index)。指数方法的基本思想是将参与作战的各种武器系统参数按照一定的算法转换成可比较的值,然后将这些参数值按照一定的算法进行计算,最后得到一个用以表示部队作战能力的值。指数方法的主要优点是作为一种简明的统计度量方法,可以从相对值和绝对值上全面说明、描述对象的内涵,使人一目了然。从20世纪60年代开始,美国开始把"指数方法"引入军事领域,用于描述现代复杂的军事对抗问题。到20世纪70年代初,美军《陆军野战演习手册》作为军事演习人员评价作战演习效果的一种规范工具,首次采纳和推广了"指数方法"及指数的概念,并沿用至今。而我国是在20世纪80年代初期,由军事科学院军事运筹所率先将指数方法引入作战模拟及教学训练,并对其做了较深入的研究推广。该所建立了快模Ⅰ号、快模Ⅱ号、快模Ⅲ号,分别用于战役、分队和师团对抗的作战模拟。

目前,国内外用于研究部队作战能力的指数方法很多,主要有杜派指数法、邓尼根指数法、泰勒指数法、相对指数法和幂指数法等。

第一节　指数建模中的数据处理方法

由于评估对象的各个性能参数的物理意义不同，因而数据的量纲也不一定相同，如射程为米、射速为发/分、反射时间为秒等。而且各因素数值的数量级相差悬殊，如射程为几千米，反应时间为几秒等。为了便于分析，保证各因素具有等效性和同序性，需要对原始数据进行处理，使之无量纲化。

无量纲化方法通常在参数中选取一个特征值或基准值，经过恰当的数学处理，将量纲不同的参数的量纲消除，这一过程称为数据的无量纲化或归一化。

一、无量纲化方法

无量纲化的关键是选择特征值，这依赖于对研究对象的深入了解和经验。恰当地选择特征值不仅可以减少独立参数的个数，而且可以帮助人们决定舍弃哪些次要因素。常用的参数无量纲化方法有直线型无量纲化方法、折线型无量纲化方法和曲线型无量纲化方法。下面主要介绍直线型无量纲化方法。

1. 直线型无量纲化方法

直线型无量纲化方法是最常用的参数无量纲化方法，如特征值法、标准化法和比重法等。

（1）特征值法

特征值有时称为阈值或临界值，是衡量数据发展变化的一些特征指标值，如极大值、极小值、平均值等。特征值无量纲化的公式典型的有

$$y_i = \frac{x_i}{\bar{x}}, \quad y_i \in \left[\frac{\min x_i}{\bar{x}}, \frac{\max x_i}{\bar{x}}\right]$$

$$y_i = \frac{x_i}{\max x_i}, \quad y_i \in \left[\frac{\min x_i}{\max x_i}, 1\right]$$

$$y_i = \frac{\max x_i - x_i}{\max x_i - \min x_i}, \quad y_i \in [0,1]$$

$$y_i = \frac{x_i - \min x_i}{\max x_i - \min x_i}, \quad y_i \in [0,1]$$

$$y_i = a\frac{x_i - \min x_i}{\max x_i - \min x_i} + b, \quad y_i \in [b, a+b]$$

式中，x_i 为有量纲参数的第 i 个样本值；$\bar{x}$ 为参数的均值；y_i 为无量纲化处理后的参数；a，b 为根据需要选取的参数。

（2）标准化法

标准化法是当对多组不同量纲的数据进行比较时，可以将它们分别标准化，转化成无量纲的标准化数据。标准化法的公式为

$$y_t = \frac{x_t - \bar{x}}{s}$$

其中

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$

（3）比重法

比重法是把参数的实际数值转化为它在总和中所占的比例。公式为

$$y_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^{n} x_i}$$

2. 折线型无量纲化方法

折线型无量纲化方法适合于数据发展呈阶段性的情况，构造折线型无量纲化方法是找出数据发展的转折点，然后确定转折点的无量纲参数，常用的公式为

$$y_i = \begin{cases} \dfrac{x_i}{x_m} y_m, & 0 \leqslant x_i \leqslant x_m \\ y_m + \dfrac{x_i - x_m}{\max x_i - x_m}(1 - y_m), & x_i > x_m \end{cases}$$

式中，x_m 为转折点的参数；y_m 为无量纲参数。

3. 曲线型无量纲化方法

曲线型无量纲方法适合于数据发展的阶段性不明显，方法主要有升半正态型、升半柯西型等。

通过以上无量纲化对原始数据进行处理以后，得到各种指数，接着就可以基于各种指数进行聚合分析了。

二、指数聚合方法

指数聚合的方法一般有和方法、积方法、逻辑“门”方法等。

1. 和方法

和方法是指代数和、加权和。该方法一般以最小作战单元效能为基本效能单位，然后以代数和或者加权和的方式进行综合。

该方法适用于多种兵力（装备）、战役（多种作战形式）效能的综合。多种兵力（装备）和战役作战效能的综合目前尚无成熟的方法。对于多种装备的效能综合的思路是将各种不同作战装备通过效能指数进行综合，即用加权和的办法，依据各种作战类型效能在整体作战效能中的位置或者任务量比例，选取恰当的加权系数。在此之前，还要将各类相关指数进行标准化或者归一化处理，即以作战能力为基准，用同一尺度来衡量。

2. 积方法

积方法是指效能的乘积。该方法适应于单兵种按作战阶段过程进行作战效能综合。对单兵或者单种武器装备通过各作战阶段过程，综合整个过程的作战效能。例如，歼击机空战一般分为搜索发现、占位、攻击、毁伤四个主要阶段，假如其发现概率为 $P_{发}$，占位概率为 $P_{占}$，对目标的命中概率为 $P_{命}$，对目标的击毁概率为 $P_{毁}$，则歼击机的空战效能为

$$E = P_{发} \times P_{占} \times P_{命} \times P_{毁}$$

3. 逻辑“门”方法

通常对作战能力的指标聚合采用加权求和的方式来进行，然而对于有些作战能力指标而言，每个下层指标作战能力指标都是关键因素，只要其中一个为零，则上层作战能力为零，加权和模型描述这种关系则有不合理的方面。因此，在进行作战能力聚合时就采用如下方法处理两种聚合关系：用“或”关系来描述加权和模型；用“与”关系来描述加权积模型。

用“或”关系来描述的下层作战能力指标以不同的权重合作（互补）聚合到上层作战能力指标。

这种方法通常适用于各评价指标间相互独立的情况，此时，各评价指标对综合评价水平的贡献彼此是没有什么影响的，由于“或”运算采用“和”的方式，其现实关系应是“部分之和等于总体”。

用“与”关系来描述加权积模型，适用于对于上层作战能力指标而言，每个下层作战能力指标的权重虽然不同，只要一个下层作战能力指标为零，则上层作战能力指标为零。

在作战能力指标体系结构中引入逻辑门：或门和与门。

或门：表示下层作战能力指标以“或”的关系聚合到上层作战能力指标。用加权和的方法进行作战能力指标聚合。

与门：表示下层作战能力指标以“与”的关系聚合到上层作战能力指标。用加权积的方法进行作战能力指标聚合。

每一种逻辑门代表各层作战能力指标的一种聚合关系及指标聚合方法，从而通过逻辑门的形式描述作战能力指标体系中各层作战能力指标的聚合关系，便于进行聚合运算。

指数方法可以采用和方法、积方法或者混合等方式。一般来说，具有相互独立性质的能力指数应采用和方法，具有串联结构性质的能力指数应采用积方法，而同时具有前面两种性质的能力指数应采用混合综合的方式，采用逻辑“门”的形式。

第二节　武器装备作战能力结构分析

武器装备是用以实施和保障军事行动的武器、武器系统和其他军事技术器材的统称，主要是指武器力量编制内的武器、弹药、车辆、机械、器材等。武器装备是赢得现代战争胜利的重要物质基础，是关系军事斗争成败的重要因素。

武器装备的作战能力是通过该武器的战术技术性能指标来反映的，对于许多的应用尤其是总体能力的反映显得十分困难。例如，某型装甲车辆与另一型号的装甲车辆相比究竟总体上差（优）多少？从一般情况上分析总共需要多少辆才能够满足要求？等等。

显然要回答这些问题，仅仅用武器装备的性能参数是很难回答的。那么，能否通过一个（或一组）数值来简明的说明该武器装备的总体作战能力，能否通过具体的数值来反映不同型号的同类型装备之间的总体差异，能否通过战技性能指标的变化来直观地反映其作战能力的变化，从而为装备发展提供借鉴与思路？

本章通过对武器装备的层次结构分析以及武器装备的战术技术性能指标的分类分析，建立武器装备作战能力量化体系来描述武器装备的作战能力属性。

一、武器装备作战能力相关概念

武器装备作战能力是指武器装备具有的能用于作战的功能特性，是完成某种作战任务的潜在效能或潜在能力。武器装备的作战能力主要由数量、质量和编成（编组）的方式等因素构成。

作战效能是指在特定条件下，武器装备被用来执行特定作战任务所能达到预期目标的有效程度。武器装备的作战效能不但与装备的数量、质量有关，而且与作战中的实际运用有关。比如交战的环境、交战的对象等因素有关系。

二、武器装备作战能力的构成要素

武器装备作战能力的五个要素为打击力、机动力、信息力、防护力和保障力，以下把这五个要素简称为五力。如图 9-1 所示。

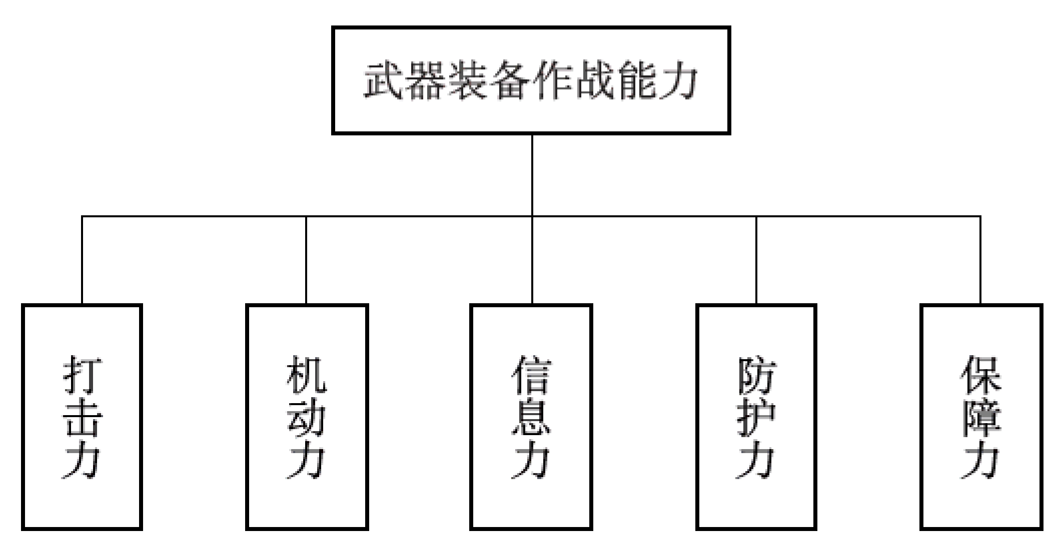


图 9-1　武器装备作战能力要素构成图

武器装备作战能力的五个分量比较全面地反映了联合作战能力的各个侧面。武器装备作战能力的五个分量反映了武器装备作战能力的几个方面。相对于单一的综合作战能力，采用五个指标的形式分析武器装备的作战能力更能比较具体地刻画武器装备的作战能力，更有针对性。在作战能力的分析中，当然，也可以通过武器装备作战能力的五个指标聚合得到武器装备综合作战能力。同时，在具体作战能力分析时，用打击力、机动力、信息力、防护力和保障力来描述武器装备的作战能力还只是总的概括，还可以对这五个分量进一步向下分解，以得到对这一分量更为详尽的描述。

下面对这五个主要的能力要素进行说明。

打击力是指武器装备所具备的主动对目标打击所产生的杀伤力和破坏力。

机动力是指武器装备所具备的进行空间位移的能力。

信息力是指武器装备所具备的信息获取、处理、传输以及电子对抗的能力。

防护力是指武器装备所具备的抵御敌杀伤、破坏的能力。

保障力是武器装备所具备的自我保障以维持或恢复作战能力的能力。

三、武器装备体系各层次的主要构成

武器装备体系分为三个层次，即装备单元、作战单元和作战编成（编组）。

（1）装备单元，是指具有某种基本作战能力属性（打击、机动、信息、防护和保障）的武器系统功能模块或子系统。装备单元按照五种基本作战能力构成要素可划分为打击类装备单元（如枪械、火炮、导弹、弹药等）、防护单元（如武器的外壳及装甲部分）、机动单元（如武器的动力装置）、信息类装备单元（如雷达、声纳、有源电子干扰设备、无源干扰器材、电台、通信机等）、保障类装备单元五大类。

（2）作战单元，是指由武器装备单元构成的，具有某种特定功能，能够独立遂行某种作战用途的武器装备。作战单元主要包括各类装甲车辆、水面舰艇或者潜艇、作战飞机等。

（3）作战编成（编组），是指由武器作战单元组合而成，但是耦合程度不如武器作战单元内的武器装备单元那样紧密。作战编成（编组）主要有航母编队、驱逐舰编队、空中攻击编队等。

四、武器装备作战能力的体系结构

前面分析与定义的武器装备的作战能力与各要素的内容，还只是在具体的武器装备自身属性的层面，而作为武器装备作战能力的作用更多是通过作战运用来体现的。因此研究武器装备的作战能力还必须从研究武器装备自身作战能力属性到作战运用的实际才能形成完整的体系。

武器装备可以分解成为装备单元和作战单元二个层次。武器装备的作战运用是通过作战编成（编组）来体现的，而作战编成（编组）则是由具体的作战单元形成的，作战单元则是由不同的武器装备单元构成的。因此，从武器装备的作战运用出发，其作战能力的构成关系可以理解为从武器装备单元到作战单元，再到作战编成（编组）的过程。而武器装备的作战能力可从打击、机动、信息、防护和保障五个要素来考虑，结合二者，则得到如图所示 9-2 所示的武器装备作战能力的量化体系。

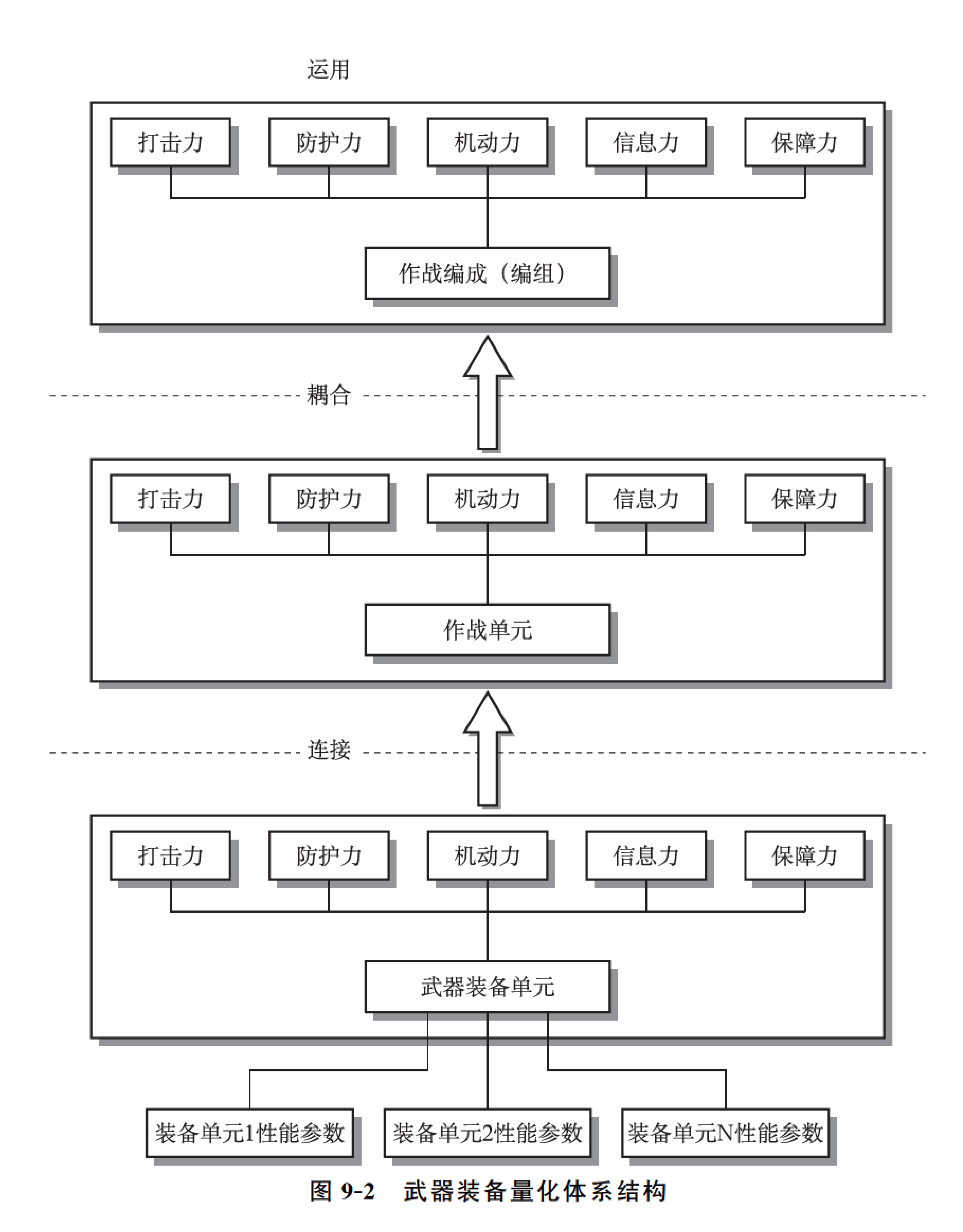


图 9-2　武器装备量化体系结构

这个结构是以武器装备为基础的作战能力分析，以各个装备单元的战技性能指标参数为基础，纵向上分为装备单元、作战单元和作战编成（编组）三个层次。横向上以打击、机动、信息、防护和保障五种作战能力为具体量化内容，通过不断地“聚合”，在每一个层面上都体现出上述五种作战能力。

为了细化和量化的目的，“五力”的基础上进一步建立了二级指标，按照装备本

身作用域及其对象作用域对装备进行了聚类，例如可将所有飞机的对空中目标打击力、对地面目标打击力、对地下目标、对水面目标和对水下目标打击力分别进行聚合，从而在一定程度上消除了不同种类飞机之间的差异，形成了可用于作战编成（编组）作战能力聚合的作战能力分量。

这样，得到作战能力指标体系的详细结构如图 9-3 所示（* 表示该分量需进一步划分，本身则不算为二级分量）。

图 9-3 给出了作战编组的作战能力构成体系，即由“五力”二级分量描述的编组作战能力。其中二级分量分别由下级编组或作战单元的对应能力分量聚合而成，这样就建立了从武器装备的“五力”分量到作战编组的“五力”二级分量的逐层聚合关系。

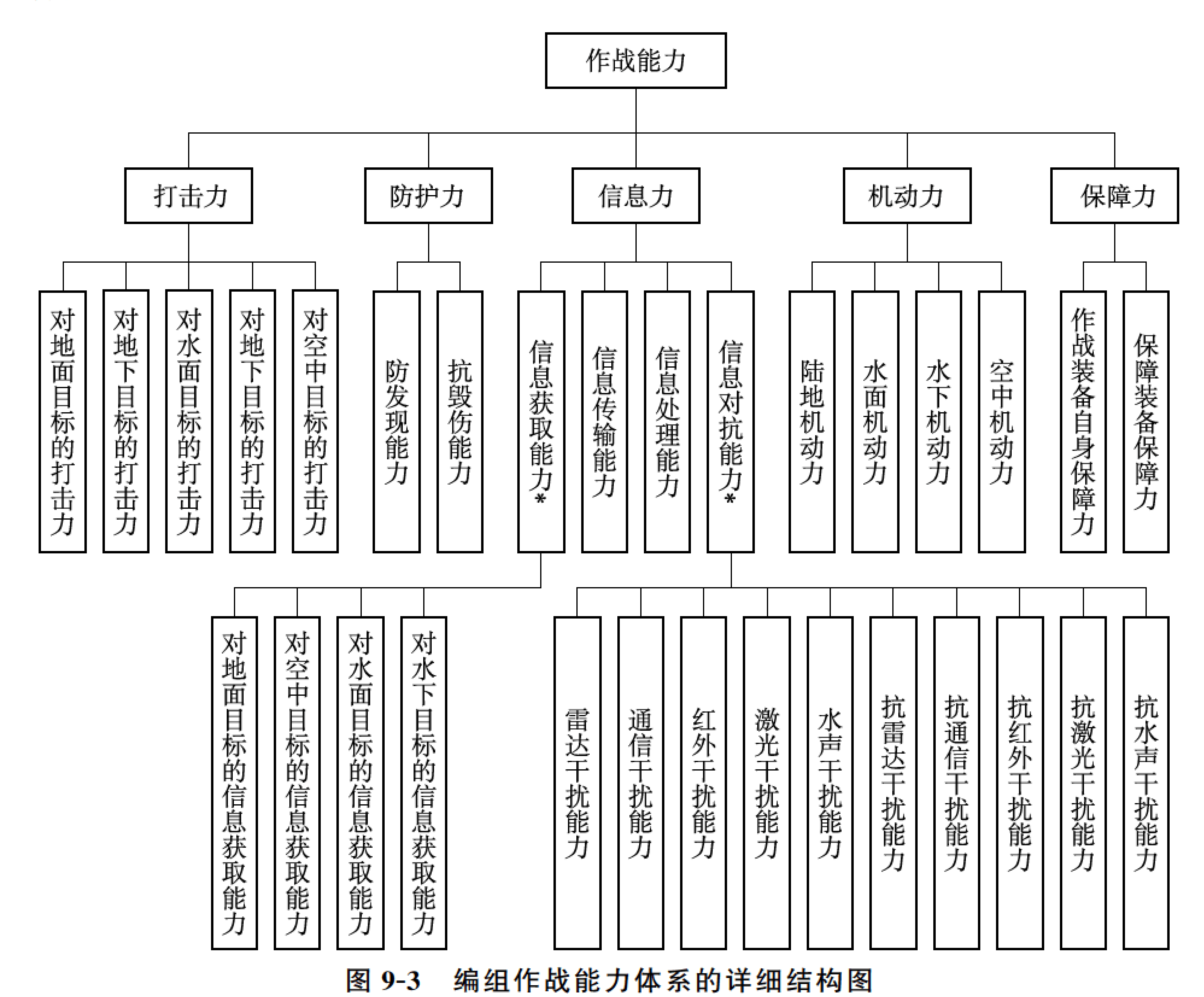


图 9-3　编组作战能力体系的详细结构图

具体聚合形式可由下面的一个例子来说明，由空中编队、水面编队和地面编队

组成联合作战编组，则联合作战编组的打击力的五个二级分量由空中编队、水面编队和地面编队的相应打击力的有关分量对应聚合。如图 9-4 所示。

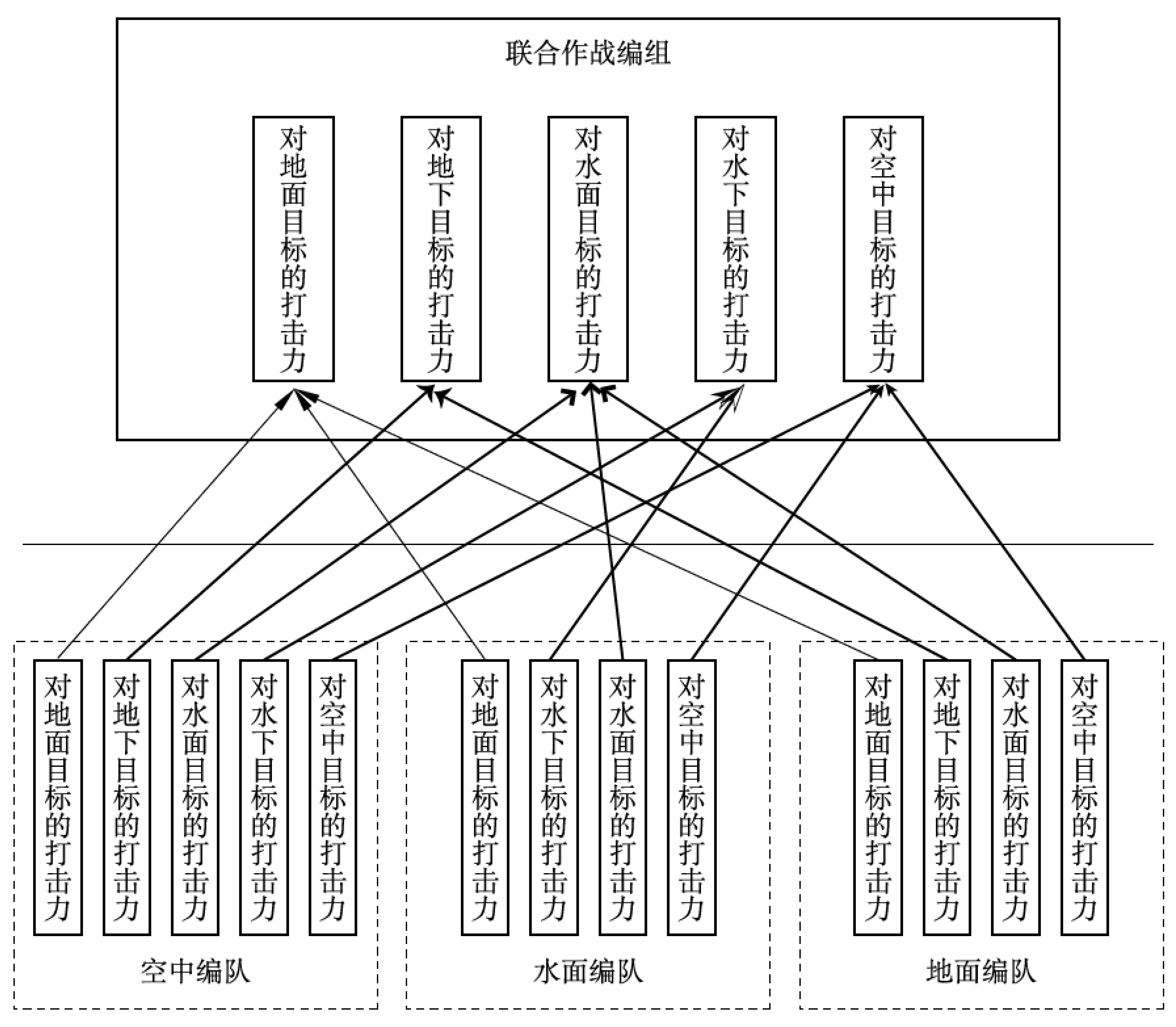


图 9-4　联合作战编组打击力聚合结构图

第三节　装备单元和作战单元的作战能力量化评价思路

武器装备各性能参数的物理意义不同，因而数据的量纲也不一定相同，如射程为米、射速为发/分、反应时间为秒等。而且各因素数值的数量级相差悬殊，如射程为几千米、反应时间为几秒等。为了便于分析，保证各因素具有等效性和同序性，

需要对原始数据进行处理，使之无量纲化和归一化，形成各种指数。

一、采用指数法作为武器装备作战能力量化的基本方法

由于指数方法具有结构简单、计算方便，而且指数是一个相对比较的无量纲数，不同的比较对象采用同一尺度衡量，因而误差可以相对减少等优点，较模拟等其他方法更适合于指挥员宏观决策分析、快速模拟、计算部队战斗力及编制装备效应论证等，因此确定采用指数方法对武器装备作战能力进行量化。

根据作战能力量化的体系结构，将作战能力区分为五个主要因素，即打击力、防护力、机动力、信息力和保障力，针对每个分量分别建立量化指标体系，先计算装备单元能力，然后按照装备单元到作战单元的组合关系和各指标体系中分指标的对应关系聚合得到作战单元各个指标的指数值。

二、指数的等效与统一

武器装备单元根据其性能指标集的相似性分成若干类，其中同类武器装备单元指数的等效不难，难的是不同类型的武器装备单元指数之间如何统一度量。由于每一种武器装备单元在作战时的作用是不完全相同的，因此给统一或等效度量带来了很大困难。目前的解决途径主要是根据经验估算，然后采用作战模拟结果拟合、历史经验数据推算、专家评价等方法，或者同时采用几种方法互验，以达到相对一致的估计值。

三、武器装备作战能力指数的表达形式

如前所述，我们认为武器装备作战能力包含以下五个主要因素，即打击力、防护力、机动力、信息力和保障力，简称为“五力”。

用数组的形式表示武器装备作战能力。例如，某种作战单元的作战能力可以用下面一个数组的形式表示：

$$(I_{综合}, I_{打击}, I_{机动}, I_{信息}, I_{防护}, I_{保障})$$

式中，$I_{综合}$，$I_{打击}$，$I_{机动}$，$I_{信息}$，$I_{防护}$，$I_{保障}$分别表示某种作战单元的综合作战能力、打击力、机动力、信息力、防护力和保障力。

又如打击力本身是作战能力的一级分量，但是为了区别不同打击类装备单元的打击力，还可以在打击力分量下建立二级分量，这样打击力就可以通过一个数组来表示：

$$(I_{对空中目标打击}, I_{对地面目标打击}, I_{对地下目标打击}, I_{对水面目标打击}, I_{对水下目标打击})$$

式中，$I_{对空中目标打击}$，$I_{对地面目标打击}$，$I_{对地下目标打击}$，$I_{对水面目标打击}$，$I_{对水下目标打击}$分别表示对空中目标的打击力、对地面目标的打击力、对地下目标的打击力、对水面目标的打击力、对水下目标的打击力。

在实际建模过程中，作战能力的指数形式将不再是单一数值，而是能够较全面地反映作战能力多方面属性的多个数值。

四、装备单元能力指数的确定方法

指数确定方法总的来说是在基于半经验半理论的基础上，由武器装备主要战术技术性能参数计算得到的用于表示武器相对作战能力的无量纲指数。

武器装备单元的能力指数可以根据其相关的性能指标用以下方法来确定：

（1）通过理论分析，建立数学函数表达式得到。

（2）通过数据处理方法得到，可以将武器装备单元的性能参数看作原始数据集，武器装备单元的能力指数则是要求得的目标数据集。一般情况下，武器装备单元性能参数之间关系十分复杂，难于通过显式的关系式来表达，但是通过对原始数据的处理，如采取灰色关联分析的方法，可以得到目标集中的一些数量关系，从而获得计算结果。

（3）通过对性能指标的无量纲化处理建立效用函数，并加以综合的方法来量化。

（4）定性和定量相结合的方法。

武器装备单元的性能指标中比较难于处理的是定性指标，可以采取根据德尔菲方法或者模糊评价的方法来量化。

五、作战单元作战能力指数的表示形式

作战单元作战能力的指数体系，表征作战单元作战能力的主要指数包括综合作战能力数组、打击力数组、防护力数组、信息力数组、机动力数组、保障力数组，如图 9-5 所示。

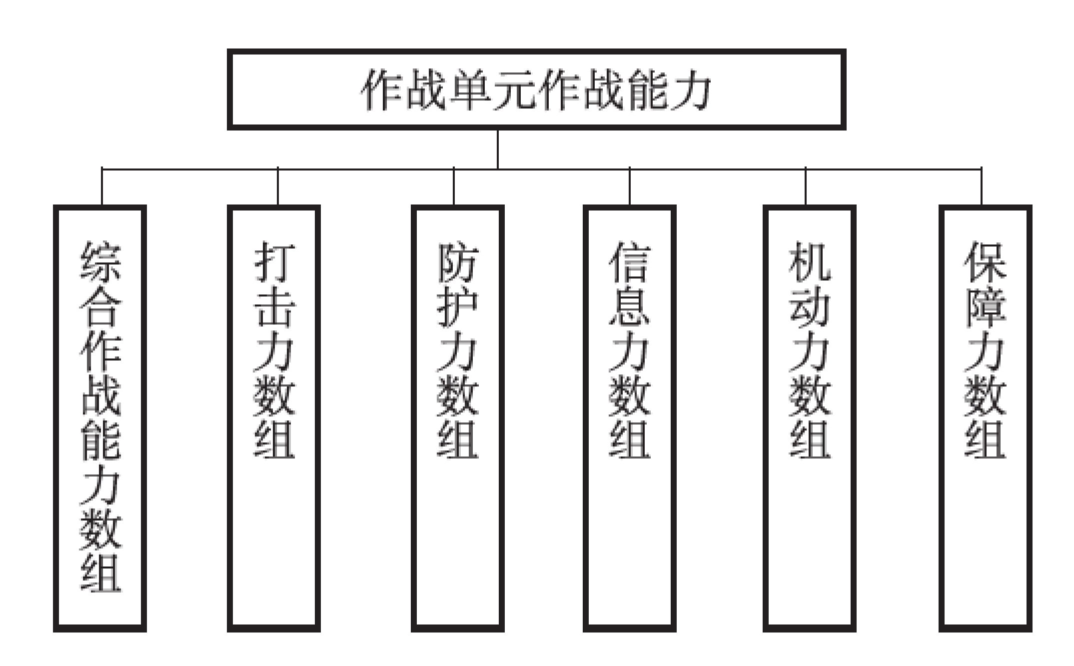


图 9-5　作战单元作战能力指数表示形式

打击力数组由综合打击力和对地面目标打击力、对地下目标打击力、对空中目标打击力、对水下目标打击力、对水面目标打击力等五个二级指标构成。

防护力数组由综合防护力和防护力(分为防发现能力和抗毁伤能力)等两个二级指标构成，综合防护力是对作战单元各个防护力二级指标进行综合得出的表征作战单元总体防护性能的一个值。

机动力数组由综合机动力和陆地机动力、空中机动力、水面机动力和水下机动力等四个机动力构成，综合机动力是对作战单元各个机动力二级指标进行综合得出的表征作战单元总体机动性能的一个值。

信息力数组由综合信息力和信息获取能力、信息传输能力、信息处理能力和电子对抗能力等四个信息力二级数值指成，是对作战单元所装备的各种信息装备单元的信息能力进行综合而得到的，用来表征作战单元的信息作战能力。

保障力数组由综合保障力和作战装备自身保障能力、保障装备保障能力等两个保障力构成，是对作战单元自身保障装备和各种保障装备单元的保障能力进行综合而得到的，用来表征作战单元的保障力。

作战单元作战能力聚合方法，按照武器装备体系层次结构，其中装备单元是基

础，作战单元是若干装备单元结合而成的基本作战单位。

作战单元作战能力的一级分量主要包括综合打击力、综合防护力、综合机动力、综合信息力及综合保障力。

第四节　作战编成（编组）作战能力量化分析与建模

作战编成（编组）作战能力是作战力量、结构以及相互间的协同的综合反映，是各部分能力和作用合成所表现出的综合效能。

一、作战编成（编组）作战能力量化方法

对编组集团的作战能力分析，首先应确定编组集团的基本作战单位。从作战单元到作战编成（编组）作战能力的聚合和解聚一般需要确定一个基本作战单位。从作战单元聚合到一个基本作战单位，基本作战单位是模拟量化时定义的最小作战单位，再由基本单位按照编制数组表向上“聚合”，可以形成上一级作战编组，在此基础上再聚合，又可以形成更高一级的作战编组。必要时也可以依据一定的方法，由基本作战单位进一步向下“分解”成更小的作战单位。

基本作战单位的级别如表 9-1 所示。

表 9-1　基本作战单位定义表

部队类型		基本作战单位级别	备　注
步兵		连	含空军空降兵、海军陆战队、武警等作战部队等
炮兵	压制炮兵（含防空）	营	炮兵建制部队
	伴随炮兵（含防空）	连	炮兵分队
	反坦克炮兵（含导弹）	连	炮兵建制部队与分队
	海岸炮兵（含岸导）	连	

续表

部队类型		基本作战单位级别	备　注
专业兵种	工兵、防化兵、通信兵、电子对抗兵等	排	
导弹	地地导弹、地空导弹	营	
保障部队	警卫、勤务	排	
飞机		架	含海军、陆军航空兵
舰艇		艘	含陆军船运部队
潜艇		艘	

作战编成(编组)作战能力的量化一般依据实际进行的作战编成(编组)作战模拟的规模、层次,根据各军兵种部队的具体情况,首先根据作战编成(编组)指数法计算基本作战单位的作战能力,然后根据作战编成(编组)作战中各军兵种部队的编制、编成与编组,由基本作战单位的作战能力向上逐步聚合计算作战编成(编组)的作战能力。

二、作战编成(编组)作战能力量化分析

从系统意义上讲,系统特性可以分为静态特性与动态特性,静态特性强调结构与能力间的关系而忽略实际环境对系统的要求和作用;动态特性强调系统总要在实际环境中运行,特定的环境对系统将产生出特定的要求和约束,因而不同的环境导致系统表现出的能力不同。以静态特性为对象进行的分析就是静态分析,以动态特性为对象的分析就是动态分析。因此,作战编成(编组)作战力量系统的能力可分为静态能力和动态能力,分别描述系统的静态特性和动态特性。静态能力是系统的固有属性,是所谓的“潜能”。动态能力则是系统在运行环境中对潜能的发挥和潜能对任务要求的适应性。作战编成(编组)作战能力的静态能力所表现出的主要是武器系统所发挥的固有潜能,而动态能力所表现出的是在不同环境、不同指挥协同状态下、不同指挥员素质、不同士气和不同训练条件下作战力量完成任务的

能力。作战编成(编组)作战能力的分析不仅要分析静态作战能力,还应分析动态作战能力。下面讨论作战编成(编组)静态作战能力量化模型和作战编成(编组)动态作战能力量化模型。

1. 作战编成(编组)静态作战能力量化模型

作战编成(编组)作战能力指数满足线性叠加,由同种武器装备编成部队的作战能力指数可根据编成内部队所拥有的基本作战单位的数量按作战能力指数的各个分量进行加权和得到。

其中,本章中有关能力聚合的公式中的“ $\sum$ ”或者“+”表示和方法,是指代数和或者加权和。一般以最小作战单位作战能力指数为基本单位,然后以代数和或者加权和的方式对同类兵力作战能力指数进行综合。

作战编成(编组)指数系列用下列数组的形式来表示:

$$A = (IS, IM, II, IG, ID)$$

式中,IS 为打击力指数;IM 为机动力指数;II 信息力指数;IG 为保障力指数;ID 为防护力指数。下面分别从空中、地面、水面、水下和导弹部队来说明作战编成(编组)作战能力的聚合。

(1) 空中作战编成(编组)作战能力聚合模型

$$\left(I_{地面} = \sum_{i=1}^{N} IS_{地面i}, I_{地下} = \sum_{i=1}^{N} IS_{地下i}, I_{空中} = \sum_{i=1}^{N} IS_{空中i}, \right.$$

$$I_{水面} = \sum_{i=1}^{N} IS_{水面i}, I_{水下} = \sum_{i=1}^{N} IS_{水下i}, I_{机动} = \sum_{i=1}^{N} IM_i,$$

$$\left. I_{信息} = \sum_{i=1}^{N} II_i, I_{保障} = \sum_{i=1}^{N} IG_i, I_{防护} = \sum_{i=1}^{N} ID_i \right)$$

式中,$I_{地面}$,$I_{地下}$,$I_{空中}$,$I_{水面}$,$I_{水下}$,$I_{机动}$,$I_{信息}$,$I_{保障}$,$I_{防护}$ 分别表示空中作战编成(编组)的对地面、对地下、对空中、对水面、对水下的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力;$IS_{地面i}$,$IS_{地下i}$,$IS_{空中i}$,$IS_{水面i}$,$IS_{水下i}$,IM_i,II_i,IG_i,ID_i 分别表示第 i 个作战单元的对地面、对地下、对空中、对水面、对水下的综合打击力、机动力、信息

力、保障力和防护力；N 表示空中作战单元的总数。

（2）地面作战编成（编组）作战能力聚合模型

$$\left(\begin{array}{l} I_{地面} = \sum_{i=1}^{N} IS_{地面i}, I_{地下} = \sum_{i=1}^{N} IS_{地下i}, I_{空中} = \sum_{i=1}^{N} IS_{空中i}, I_{水面} = \sum_{i=1}^{N} IS_{水面i}, \\ I_{机动} = \sum_{i=1}^{N} IM_i, I_{信息} = \sum_{i=1}^{N} II_i, I_{保障} = \sum_{i=1}^{N} IG_i, I_{防护} = \sum_{i=1}^{N} ID_i \end{array} \right)$$

式中，$I_{地面}$，$I_{地下}$，$I_{空中}$，$I_{水面}$，$I_{机动}$，$I_{信息}$，$I_{保障}$，$I_{防护}$ 分别表示地面作战编成（编组）的对地面、对地下、对空中、对水面的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；$IS_{地面i}$，$IS_{地下i}$，$IS_{空中i}$，$IS_{水面i}$，IM_i，II_i，IG_i，ID_i 分别表示第 i 个作战单元的对地面、对地下、对空中、对水面的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；N 表示地面作战单元的总数。

（3）水面作战编成（编组）作战能力聚合模型

$$\left(\begin{array}{l} I_{地面} = \sum_{i=1}^{N} IS_{地面i}, I_{地下} = \sum_{i=1}^{N} IS_{地下i}, I_{空中} = \sum_{i=1}^{N} IS_{空中i}, I_{水面} = \sum_{i=1}^{N} IS_{水面i}, \\ I_{水下} = \sum_{i=1}^{N} IS_{水下i}, I_{机动} = \sum_{i=1}^{N} IM_i, I_{信息} = \sum_{i=1}^{N} II_i, I_{保障} = \sum_{i=1}^{N} IG_i, I_{防护} = \sum_{i=1}^{N} ID_i \end{array} \right)$$

式中，$I_{地面}$，$I_{地下}$，$I_{空中}$，$I_{水面}$，$I_{水下}$，$I_{机动}$，$I_{信息}$，$I_{保障}$，$I_{防护}$ 分别表示水面作战编成（编组）的对地面、对地下、对空中、对水面、对水下的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；$IS_{地面i}$，$IS_{地下i}$，$IS_{空中i}$，$IS_{水面i}$，$IS_{水下i}$，IM_i，II_i，IG_i，ID_i 分别表示第 i 个作战单元的对地面、对地下、对空中、对水面、对水下的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；N 表示水面作战单元的总数。

（4）水下作战编成（编组）作战能力聚合模型

$$\left(\begin{array}{l} I_{水面} = \sum_{i=1}^{N} IS_{水面i}, I_{水下} = \sum_{i=1}^{N} IS_{水下i}, I_{机动} = \sum_{i=1}^{N} IM_i, \\ I_{信息} = \sum_{i=1}^{N} II_i, I_{保障} = \sum_{i=1}^{N} IG_i, I_{防护} = \sum_{i=1}^{N} ID_i \end{array} \right)$$

式中，$I_{水面}$，$I_{水下}$，$I_{机动}$，$I_{信息}$，$I_{保障}$，$I_{防护}$ 分别表示水下作战编成（编组）的对水面、对水下的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；$IS_{水面i}$，$IS_{水下i}$，IM_i，II_i，IG_i，

ID_i 分别表示第 i 个作战单元的对水面、对水下的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；N 表示水下作战单元的总数。

（5）导弹部队作战编成（编组）作战能力聚合模型

$$\left(I_{地面} = \sum_{i=1}^{N} IS_{地面i}, I_{地下} = \sum_{i=1}^{N} IS_{地下i}, I_{空中} = \sum_{i=1}^{N} IS_{空中i}, I_{水面} = \sum_{i=1}^{N} IS_{水面i}, \right.$$

$$\left. I_{机动} = \sum_{i=1}^{N} IM_i,\ I_{信息} = \sum_{i=1}^{N} II_i, I_{保障} = \sum_{i=1}^{N} IG_i, I_{防护} = \sum_{i=1}^{N} ID_i \right)$$

式中，$I_{地面}$，$I_{地下}$，$I_{空中}$，$I_{水面}$，$I_{机动}$，$I_{信息}$，$I_{保障}$，$I_{防护}$ 分别表示导弹部队作战编成（编组）的对地面、对地下、对空中、对水面的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；$IS_{地面i}$，$IS_{地下i}$，$IS_{空中i}$，$IS_{水面i}$，IM_i，II_i，IG_i，ID_i 分别表示第 i 个作战单元的对地面、对地下、对空中、对水面的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；N 表示导弹部队作战单元的总数。

综合可得，联合作战的作战编成（编组）作战静态综合作战能力聚合模型为

$$\begin{cases} E_{空中} = I_{地面部队空中} + I_{空中部队空中} + I_{水面部队空中} + I_{导弹部队空中} \\ E_{地面} = I_{地面部队地面} + I_{空中部队地面} + I_{水面部队地面} + I_{导弹部队地面} \\ E_{地下} = I_{地面部队地下} + I_{空中部队地下} + I_{水面部队地下} + I_{导弹部队地下} \\ E_{水面} = I_{地面部队水面} + I_{空中部队水面} + I_{水面部队水面} + I_{导弹部队水面} \\ E_{水下} = I_{地面部队水下} + I_{空中部队水下} + I_{水面部队水下} + I_{导弹部队水下} \\ E_{机动} = I_{地面部队机动} + I_{空中部队机动} + I_{水面部队机动} + I_{导弹部队机动} \\ E_{信息} = I_{地面部队信息} + I_{空中部队信息} + I_{水面部队信息} + I_{导弹部队信息} \\ E_{保障} = I_{地面部队保障} + I_{空中部队保障} + I_{水面部队保障} + I_{导弹部队保障} \\ E_{防护} = I_{地面部队防护} + I_{空中部队防护} + I_{水面部队防护} + I_{导弹部队防护} \end{cases}$$

式中，$E_{空中}$ 表示作战编成（编组）对空中目标打击力静态综合作战能力指数；$I_{地面部队空中}$，$I_{空中部队空中}$，$I_{水面部队空中}$，$I_{导弹部队空中}$ 表示作战编成（编组）中地面部队、空中部队、水面部队、导弹部队对空中目标打击力的作战能力指数，其余依此类推。

2. 作战因素研究

武器装备的作战能力在考虑静态作战能力的基础上，还应考虑作战类型、作战气象因素、作战地形因素、作战目标、部队的协同因素、训练因素、作战时间、战斗作风因素、民众的支持程度、战场的兵力分布密度等因素。

(1) 作战类型

作战类型一般分为进攻和防御两种，如果是发生在突然袭击的进攻作战中，进攻方的作战效能体现得很充分。在依托阵地防御的时候，防御方依托工事，则它的伤亡一般比进攻方要小，进攻一方的伤亡则比较大。

(2) 作战气象因素

气象是指作战地区的气候类型及作战时刻的季节和天气状况，主要包括温度、湿度、风力、雨量、冰雪覆盖、能见度等。在以高技术对抗为特点的现代战争中，气象条件的作用愈发突出，是影响战争胜负的一个十分重要的自然环境因素。

(3) 作战地形因素

地形是对作战活动影响最大的环境因素。地形是军队陆战行动的客观基础，是各级指挥员下定决心的基本依据，是组织指挥军队作战的重要因素。在指挥决策中，研究地形、利用地形、趋利避害对保证作战的胜利具有重要意义。特别是以合成军队立体作战和快速反应为特点的现代战争，对研究和利用地形提出了新的要求。范围扩展了，完成的时间要求缩短了，对结果的描述从定性变为定量。

对火力效率的研究表明，不同的地形条件对火力效率有不同的影响。例如，在灌木林中，炮弹爆炸后有 80%以上的弹片将被 6m 以内的树木所阻挡；在高约 2m 的草地上，手榴弹地面爆炸的杀伤半径仅为 4～6m，比普通情况下降 15%～30%。

地形可降低作战单位的机动力，妨碍观察，影响射击。各种地形使作战单位战斗力的下降幅度一般为 0～50%，平均为 15%。地形使进攻作战单位作战效率的降低程度如表 9-2 所示。

表 9-2 地形对作战单位作战效率的影响

地形类	山地	丘陵地	平坦地	沼泽地	居民地
下降率	25%～50%	0～20%	0～20%	20%～40%	10%～20%

（4）作战目标

不同的武器装备都是有具体功能的，针对不同的作战目标发挥其功能的效能会不一样，对于空中目标、地面目标、地下目标、水面目标和水下目标，同样的武器装备针对不同的作战对象，发挥的作用会不一样。而且，每种武器装备的使用都有一定的范围，范围不一样，作战的效果就会不一样。

（5）部队的协同因素

如果把作战编成（编组）整体作战能力看作一个体系，那么构成这个体系的各军兵种作战能力就是这个体系中的各个部分或分系统。分系统之间互相协同，有机地结合在一起形成整体作战能力。不同军兵种在不同的作战空间具有不同的优势，把诸军兵种作战力量作战编成（编组）起来作战，就可以把不同空间的作战优势汇聚成一个立体、高效的整体作战能力，其总体作战效果超过单一军（兵）种作战效果之和，这就是所谓的作战编成（编组）增效作用。

（6）训练因素

战斗人员掌握基本技能以及掌握战术技术的熟练程度对于作战的损耗有着至关重要的影响。平时训练的科目、训练的强度以及针对性与战场的损耗有着密切的关系。人的因素包括作战指挥人员、使用装备人员、装备维修人员和管理装备人员。战争的要素是人、装备以及两者的结合。高技术的出现，不仅不可能改变人与武器、人与战争的关系，反而增强了它们对人的依赖性。如果人员素质不高，即使有了先进的武器装备，也很难在现代战争中派上用场。在现代战争中，提高人员素质，充分发挥人的主观能动作用，对于保证战争的胜利比以往任何时候都更加重要。

（7）作战时间

作战的时间不同，对作战双方的影响会不一样。实施夜间攻击，随着红外、激光等夜视设备和卫星导航系统装备部队，不仅使得空中力量的夜间攻击能力得到了提高，而且为空袭武器利用夜幕快速定位、发现并摧毁目标创造了条件，使得夜战成为发起空袭的首选时机。例如，在海湾战争、波黑战争和科索沃战争中，美军作战的夜间飞行架次占总出动架次的70%以上。夜间空袭不仅容易达成攻击的突然性，增加己方的安全性，降低飞机的战损率，而且使得对方很难利用夜暗维修恢复武器装备和补充补给，可进一步扩大空袭效果，并且给对方造成巨大的精神恐

慌。同样,如果是白昼,那么容易进行维修和保障。因此,实施夜间攻击已经成为降低攻击方战损率的基本战法。

(8) 战斗作风

部队战斗作风是看不见摸不着的东西,却是客观存在的,可以说每个部队都有自己的作风,疲疲沓沓是作风,雷厉风行也是作风。打起仗来,怕痒怕痛是作风,打起仗来不怕走路不怕伤亡能强攻能防守也是作风。部队战斗作风是个无形的巨大的力量。

(9) 民众的支持程度

由于现代条件下的人民战争具有高技术性的特点,以数量取胜的动员体系已难以适应,转向以质量为重点的人民战争动员的方式方法。从人民群众参战方面看,大多数人民群众直接参战的机会相对减少,人民群众作为参战的一支重要力量,将由过去的人力支援更多地转向技术支援和智力支援,人民群众主要是要坚守岗位,立足本职,多作贡献。因此,在现代条件下人民群众的参战形式,在总体上将由以往那种全面参战转向局部参战、直接参战更多地转向间接参战,由人力参战支前为主更多地转向以技术力量参战支前为主。民众的支持程度是作战效能发挥的一个重要因素。

(10) 战场的兵力分布密度

根据部队疏散方式的不同,一般将目标群分为两种类型:疏散目标群和密集目标群疏散目标群是指这样一种目标群,其中各个单个目标之间的距离较大,用来击毁一个单个目标的导弹不能击毁另外任何一个单个目标。疏散目标群的特点是,各个单个目标之间的距离不仅比导弹的散布区大,而且比导弹的摧毁作用区大。密集目标群是指这样一种目标群,其中各个单个目标之间的距离较小,用来击毁一个单个目标的导弹,有可能同时击毁另外一个单个目标。密集目标群的特点是,各个单个目标之间的距离不仅比导弹的散布区小,而且比导弹的摧毁作用区小。显然,由于部队疏散方式的不同,武器装备的作战效能的发挥程度也会不相同。

综上所述,作战效能影响因素如图 9-6 所示。

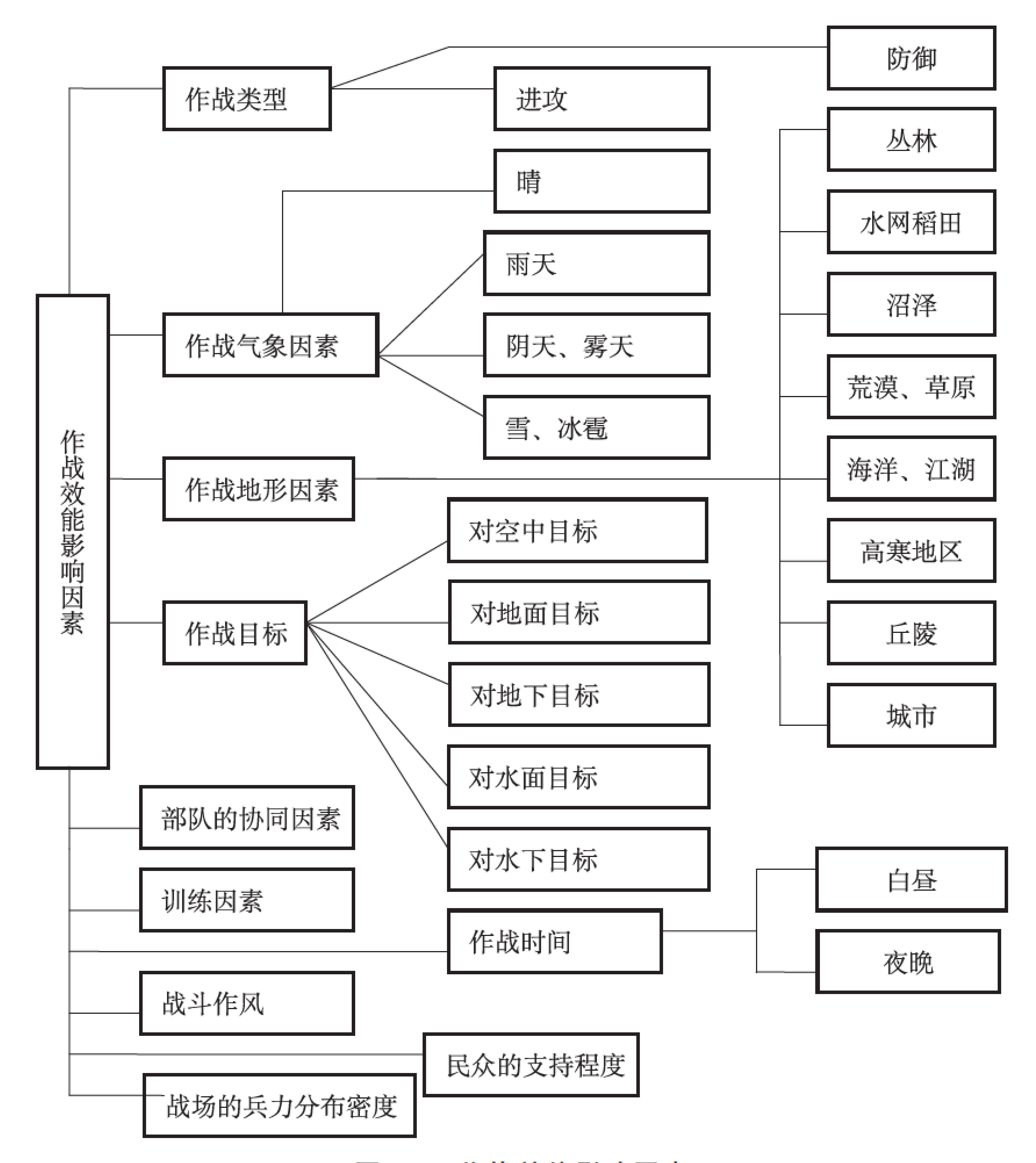


图 9-6　作战效能影响因素

3. 作战编成(编组)动态作战能力量化模型

作战编成(编组)的动态作战能力是指在考虑静态作战能力的基础上，还应考虑作战类型、作战气象因素、作战地形因素、作战目标、部队的协同因素、训练因素、作战时间、战斗作风、民众的支持程度、战场的兵力分布密度等。将上述因素量化为类型因子、天气因子、地形因子、目标因子、协同因子、训练因

子、作风因子、支持因子、分布密度因子等 10 个相应的修正系数，分别用 $\rho_{类型}$，$\rho_{天气}$，$\rho_{地形}$，$\rho_{目标}$，$\rho_{协同}$，$\rho_{训练}$，$\rho_{时间}$，$\rho_{作风}$，$\rho_{支持}$，$\rho_{密度}$ 来表示，这些修正系数需要根据经验得到。

因此，相应的作战编成（编组）动态作战能力量化模型如下：

1. 空中作战编成（编组）作战能力聚合模型

$$
\begin{cases}
I_{地面动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{地形}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\rho_{密度}\rho_{目标}\sum\limits_{i=i}^{N} IS_{地面i} \\
I_{地下动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{地形}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\rho_{密度}\rho_{目标}\sum\limits_{i=1}^{N} IS_{地下i} \\
I_{空中动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\rho_{密度}\rho_{目标}\sum\limits_{i=1}^{N} IS_{空中i} \\
I_{水面动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\rho_{密度}\rho_{目标}\sum\limits_{i=1}^{N} IS_{水面i} \\
I_{水下动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\rho_{密度}\rho_{目标}\sum\limits_{i=1}^{N} IS_{水下i} \\
I_{机动动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{地形}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\sum\limits_{i=1}^{N} IM_{i} \\
I_{信息动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{地形}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\rho_{密度}\rho_{目标}\sum\limits_{i=1}^{N} II_{i} \\
I_{保障动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{地形}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\rho_{密度}\rho_{目标}\sum\limits_{i=1}^{N} IG_{i} \\
I_{防护动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{地形}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\rho_{密度}\rho_{目标}\sum\limits_{i=1}^{N} ID_{i}
\end{cases}
$$

式中，$I_{地面动态}$，$I_{地下动态}$，$I_{空中动态}$，$I_{水面动态}$，$I_{水下动态}$，$I_{机动动态}$，$I_{信息动态}$，$I_{保障动态}$，$I_{防护动态}$ 分别表示空中作战编成（编组）对地面、对地下、对空中、对水面、对水下的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；$IS_{地面i}$，$IS_{地下i}$，$IS_{空中i}$，$IS_{水面i}$，$IS_{水下i}$，IM_i，II_i，IG_i，ID_i 分别表示第 i 个作战单元的对地面、对地下、对空中、对水面、对水下的综

合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；N 表示空中作战单元的总数。

2. 地面作战编成(编组)作战能力聚合模型

$$
\begin{cases}
I_{地面动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{地形}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\rho_{密度}\rho_{目标}\sum_{i=i}^{N} IS_{地面i} \\
I_{地下动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{地形}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\rho_{密度}\rho_{目标}\sum_{i=1}^{N} IS_{地下i} \\
I_{空中动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\rho_{密度}\rho_{目标}\sum_{i=1}^{N} IS_{空中i} \\
I_{水面动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\rho_{密度}\rho_{目标}\sum_{i=1}^{N} IS_{水面i} \\
I_{水下动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\rho_{密度}\rho_{目标}\sum_{i=1}^{N} IS_{水下i} \\
I_{机动动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{地形}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\sum_{i=1}^{N} IM_{i} \\
I_{信息动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{地形}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\rho_{密度}\rho_{目标}\sum_{i=1}^{N} II_{i} \\
I_{保障动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{地形}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\rho_{密度}\rho_{目标}\sum_{i=1}^{N} IG_{i} \\
I_{防护动态} = \rho_{类型}\rho_{天气}\rho_{地形}\rho_{作风}\rho_{协同}\rho_{支持}\rho_{时间}\rho_{密度}\rho_{目标}\sum_{i=1}^{N} ID_{i}
\end{cases}
$$

式中，$I_{地面动态}$，$I_{地下动态}$，$I_{空中动态}$，$I_{水面动态}$，$I_{水下动态}$，$I_{机动动态}$，$I_{信息动态}$，$I_{保障动态}$，$I_{防护动态}$ 分别表示地面作战编成(编组)对地面、对地下、对空中、对水面、对水下的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；$IS_{地面i}$，$IS_{地下i}$，$IS_{空中i}$， $IS_{水面i}$，$IS_{水下i}$，IM_i，II_i，IG_i，ID_i 分别表示第 i 个作战单元的对地面、对地下、对空中、对水面、对水下的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；N 表示地面作战单元的总数。

3. 水面作战编成(编组)作战能力聚合模型

$$\begin{cases} I_{\text{地面动态}}=\rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{地形}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}}\sum_{i=i}^{N}IS_{\text{地面}i} \\ I_{\text{地下动态}}=\rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{地形}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}}\sum_{i=1}^{N}IS_{\text{地下}i} \\ I_{\text{空中动态}}=\rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}}\sum_{i=1}^{N}IS_{\text{空中}i} \\ I_{\text{水面动态}}=\rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}}\sum_{i=1}^{N}IS_{\text{水面}i} \\ I_{\text{水下动态}}=\rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}}\sum_{i=1}^{N}IS_{\text{水下}i} \\ I_{\text{机动动态}}=\rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{地形}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\sum_{i=1}^{N}IM_{i} \\ I_{\text{信息动态}}=\rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{地形}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}}\sum_{i=1}^{N}II_{i} \\ I_{\text{保障动态}}=\rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{地形}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}}\sum_{i=1}^{N}IG_{i} \\ I_{\text{防护动态}}=\rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{地形}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}}\sum_{i=1}^{N}ID_{i} \end{cases}$$

式中，$I_{\text{地面动态}}$，$I_{\text{地下动态}}$，$I_{\text{空中动态}}$，$I_{\text{水面动态}}$，$I_{\text{水下动态}}$，$I_{\text{机动动态}}$，$I_{\text{信息动态}}$，$I_{\text{保障动态}}$，$I_{\text{防护动态}}$ 分别表示水面作战编成(编组)对地面、对地下、对空中、对水面、对水下的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；$IS_{\text{地面}i}$，$IS_{\text{地下}i}$，$IS_{\text{空中}i}$，$IS_{\text{水面}i}$，$IS_{\text{水下}i}$，IM_i，II_i，IG_i，ID_i 分别表示第 i 个作战单元的对地面、对地下、对空中、对水面、对水下的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；N 表示水面作战单元的总数。

4. 水下作战编成(编组)作战能力聚合模型

$$\begin{cases} I_{\text{水面动态}}=\rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}}\sum_{i=1}^{N}IS_{\text{水面}i} \\ I_{\text{水下动态}}=\rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}}\sum_{i=1}^{N}IS_{\text{水下}i} \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{\text{机动动态}} = \rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{地形}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}} \sum_{i=1}^{N} IM_i \\ I_{\text{信息动态}} = \rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{地形}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}} \sum_{i=1}^{N} II_i \\ I_{\text{保障动态}} = \rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{地形}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}} \sum_{i=1}^{N} IG_i \\ I_{\text{防护动态}} = \rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{地形}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}} \sum_{i=1}^{N} ID_i \end{cases}$$

式中，$I_{\text{水面动态}}$，$I_{\text{水下动态}}$，$I_{\text{信息动态}}$，$I_{\text{机动动态}}$，$I_{\text{保障动态}}$，$I_{\text{防护动态}}$分别表示水下作战编成（编组）对水面、对水下的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；$IS_{\text{水面}i}$，$IS_{\text{水下}i}$，IM_i，II_i，IG_i，ID_i分别表示第i个作战单元的对水面、对水下的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；N表示水下作战单元的总数。

5. 导弹部队作战编成（编组）作战能力分析模型

$$\begin{cases} I_{\text{地面动态}} = \rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{地形}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}} \sum_{i=i}^{N} IS_{\text{地面}i} \\ I_{\text{地下动态}} = \rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{地形}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}} \sum_{i=1}^{N} IS_{\text{地下}i} \\ I_{\text{空中动态}} = \rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}} \sum_{i=1}^{N} IS_{\text{空中}i} \\ I_{\text{水面动态}} = \rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}} \sum_{i=1}^{N} IS_{\text{水面}i} \\ I_{\text{机动动态}} = \rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{地形}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}} \sum_{i=1}^{N} IM_i \\ I_{\text{信息动态}} = \rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{地形}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}} \sum_{i=1}^{N} II_i \\ I_{\text{保障动态}} = \rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{地形}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}} \sum_{i=1}^{N} IG_i \\ I_{\text{防护动态}} = \rho_{\text{类型}}\rho_{\text{天气}}\rho_{\text{地形}}\rho_{\text{作风}}\rho_{\text{协同}}\rho_{\text{支持}}\rho_{\text{时间}}\rho_{\text{密度}}\rho_{\text{目标}} \sum_{i=1}^{N} ID_i \end{cases}$$

式中，$I_{地面动态}$，$I_{地下动态}$，$I_{空中动态}$，$I_{水面动态}$，$I_{机动动态}$，$I_{信息动态}$，$I_{保障动态}$，$I_{防护动态}$ 分别表示导弹部队作战编成(编组)对地面、对地下、对空中、对水面的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；$IS_{地面i}$，$IS_{地下i}$，$IS_{空中i}$，$IS_{水面i}$，IM_i，II_i，IG_i，ID_i 分别表示第 i 个作战单元的对地面、对地下、对空中、对水面的综合打击力、机动力、信息力、保障力和防护力；N 表示导弹部队作战单元的总数。

则联合作战编成(编组)的动态综合作战能力量化模型为

$$\begin{cases} E_{空中动态} = I_{地面部队空中动态} + I_{空中部队空中动态} + I_{水面部队空中动态} + I_{导弹部队空中动态} \\ E_{地面动态} = I_{地面部队地面动态} + I_{空中部队地面动态} + I_{水面部队地面动态} + I_{导弹部队地面动态} \\ E_{地下动态} = I_{地面部队地下动态} + I_{空中部队地下动态} + I_{水面部队地下动态} + I_{导弹部队地下动态} \\ E_{水面动态} = I_{地面部队水面动态} + I_{空中部队水面动态} + I_{水面部队水面动态} + I_{导弹部队水面动态} \\ E_{水下动态} = I_{地面部队水下动态} + I_{空中部队水下动态} + I_{水面部队水下动态} + I_{导弹部队水下动态} \\ E_{机动动态} = I_{地面部队机动动态} + I_{空中部队机动动态} + I_{水面部队机动动态} + I_{导弹部队机动动态} \\ E_{信息动态} = I_{地面部队信息动态} + I_{空中部队信息动态} + I_{水面部队信息动态} + I_{导弹部队信息动态} \\ E_{保障动态} = I_{地面部队保障动态} + I_{空中部队保障动态} + I_{水面部队保障动态} + I_{导弹部队保障动态} \\ E_{防护动态} = I_{地面部队防护动态} + I_{空中部队防护动态} + I_{水面部队防护动态} + I_{导弹部队防护动态} \end{cases}$$

式中，$E_{空中动态}$ 表示作战编成(编组)对空中目标打击力动态综合作战能力指数；$I_{地面部队空中动态}$，$I_{空中部队空中动态}$，$I_{水面部队空中动态}$，$I_{导弹部队空中动态}$ 表示作战编成(编组)中地面部队、空中部队、水面部队、导弹部队对空中目标打击力动态作战能力指数，其余依此类推。



评价在本质上是一种管理行为。军事需求作为国家力量和战略竞争的重要内容,任何一个主权国家,都不会轻视或者放弃军事的作用。评价在促进军事需求的提出、改革、管理和提高综合等方面起到了积极作用。但同时,人们对评价工作也提出了质疑,如军事需求的综合能不能评价?评价会不会与军事需求的多样化产生矛盾?评价标准、方法是否科学?这些问题如果不在理论上予以明确回答,那么,在实践中必定不利于评价工作的良好发展。

第一节　指标体系概述

一、指标体系相关概念

指标是用来反映一定时间尺度上对象系统的状态,通过指标可以使人们对对象系统产生一种较小的、易操作的、切实的和生动的实体画面。从指标反映的内容范围来划分,指标可以分为三类。

（1）单项指标：侧重于对基本情况的描述，反映系统中的一个侧面，综合性比较差。

（2）专题指标：选择有代表性的专题领域进行研究制定指标，用来反映一个特定方面的问题。

（3）系统化指标：在一个确定的研究范围和框架中，对大量的有关信息进行综合与集成，从而形成一个具有明确含义的指标。

指标体系是指两个或两个以上的指标组合，它可以表示一个系统一般的发展趋势，通过将多种指标和数据的综合，可以勾画出对象系统的发展变化整体趋势。用指标体系来描写综合目标，目的在于寻求一组具有代表意义，同时又能全面反映对象系统各方面要求的特征，通过指标组合使人们对整个系统有一个定量或定性的了解。

二、指标体系建立流程

军事需求评价指标体系是由若干相互联系、相互补充、具有层次性和结构性的指标组成的有机系列。这些指标既有直接从原始数据而来的基本指标，用以反映子系统的特征；又有对基本指标的抽象和总结，用以说明子系统之间的联系及区域复合系统作为一个整体所具有的性质。在选择指标时要特别注意选择那些具有重要控制意义、可受到管理措施直接或间接影响的指标，和选择那些与外部环境有交换关系的开放系统特征的指标。同时，要考虑评价指标体系的可操作性、数据的可获得性。需要在总结和吸取前人研究经验的基础上遵循建立军事需求评价指标体系的基本原则，建立指标体系。

建立军事需求评价的指标体系要紧密结合评价对象的特点和提高可操作性，因此根据指标筛选程序图，指标的选取以统计数据为基础，在指标的筛选过程中，采用频度统计法、相关性分析法、理论分析法和专家咨询法筛选指标，以满足科学性和系统全面性原则。

频度统计法是对目前有关情况等进行统计，初步确定出一些使用频度较高的指标。

相关性分析是对指标进行统计分析，确定出指标间的相互关联程度，结合一定

的取舍标准和专家意见进行筛选。

理论分析法是对军事需求评价的内涵、特征进行分析综合，确定出重要的、能体现军事需求特征的指标。

专家咨询法是在建立指标体系的整个过程中，适时适当地征询有关专家的意见，对指标进行调整。理论分析法和专家咨询法几乎贯穿建立指标体系的整个过程。

通过多层次的筛选，得到内涵丰富又相对独立的指标所构成的评价指标体系。指标筛选过程如图 10-1 所示。

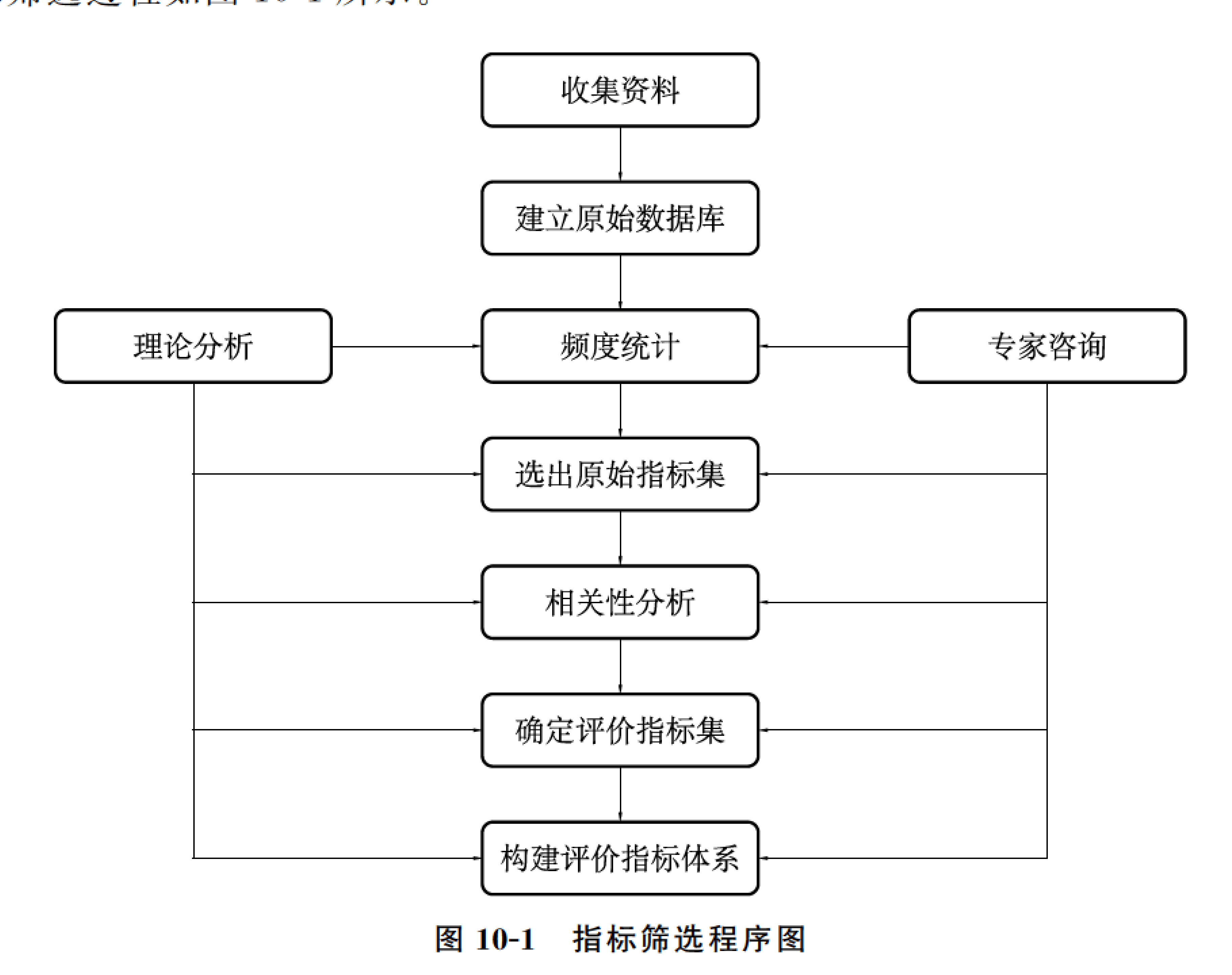


图 10-1　指标筛选程序图

第二节　军事需求的评价标准及原则

从军事需求评价的内涵可以看出，评价活动是一种群体行为。为了使军事需

求评价全面、客观、有效，必须制定评价标准。军事需求评价指标是用来衡量和计算军事需求达到预定目的程度的标准，是评价的准绳。评价标准由指标名称、指标含义和测量值的计算标准等组成。单个评价指标只能反映评价对象某个方面的特征状态。由反映军事需求评价各方面特征状态的指标构成的评价指标总和，构成军事需求评价指标体系。进行军事需求评价，必须首先制定科学、完整的军事需求评价标准体系。

建立指标体系应该遵循以下几方面的原则。

一、科学性原则

科学性原则是指评价标准体系的建立必须是科学有价值的，能准确地按照军事需求的规律和客观要求，提高评价活动的工作效率。科学性原则是军事需求评价的生命。军事需求评价科学化的核心是按照科学精神进行评价，要根据可靠的知识和合理的价值观进行评价。

指标的设计应该科学，指标的定义、计算方法等不能离开军事需求综合评价及其相关概念的基本理论，每一个指标的名称、定义、解释、计算方法、分类等要讲究科学性、真实性、规范性。

科学性原则主要包括以下三个方面。

（1）要求确定的评价指标体系是科学的。要针对评价内容，分析研究评价对象的规律，探讨评价科学化的途径和原则。

（2）指标含义要明确，尽量减少歧义。

（3）对评价指标进行计算、测评所采用的方法也必须是科学的。军事需求评价的内容很多，涉及的因素也很复杂，许多因素不能定量，因此，确定的指标必须既适于定量分析，又利于定性分解和综合量化，能够真实地反映评价问题。

二、可操作性原则

可操作性主要从数据可得性分析，考虑到指标的可取性、可比性、可测性、可控

性。指标不是选取的越多越好，要考虑到指标的量化以及数据取得的难易程度和可靠性。做到评价指标及设计方法易于掌握，所需数据易于统计，并尽可能利用现存的各种统计数据，选择主要的、基本的、有代表性的综合指标作为量化的计算指标。

可操作性原则主要包括以下四个方面。

（1）选取指标时充分考虑定量指标与定性指标的结合，可量化的指标尽可能用数值表示，不能量化的指标要作质的规定，进行定性转化。同时，为了保证指标的客观性，指标评价的结果应可以校验。

（2）测评数据的获得要具有可操作性，易于采集、测算和利于评价活动的实施，数据的获得也要简便易行。

（3）评价的指标标准应具有一定的阈值范围，在评价中建立的指标应允许合理的修正。

（4）评价指标量化的方法或者模型不能过于复杂。

三、层次性原则

军事需求综合评价是一个包含几个层次的复杂系统，它可以分解成为若干个小系统，指标体系应该包含自上而下的各个层次。

层次性原则是指评价标准体系的建立必须根据评价内容的内在关系，划分层次，形成递阶层次结构的评价标准体系。在多指标评价体系中，要由评价总指标向下层指标逐渐分解，对指标进行分类、分层。指标系统逐层分解的目的是得到更具体的指标，以便进行量化。从不同的考核视角出发，有不同的分类结果，但最终要形成层次分明的树状评价指标体系如图 10-2 所示。

层次性原则主要包括以下两个方面。

（1）递阶层次结构中的指标相互独立，互不交叉，互不包含。这一方面反映了指标体系的科学性和精确性，同时又兼顾到了完整性和全面性方面的要求。

（2）在数据集成时，应按照递阶层次结构的方向，由最低层的指标开始，逐级向上一层的指标集成，最后得到综合评价值。

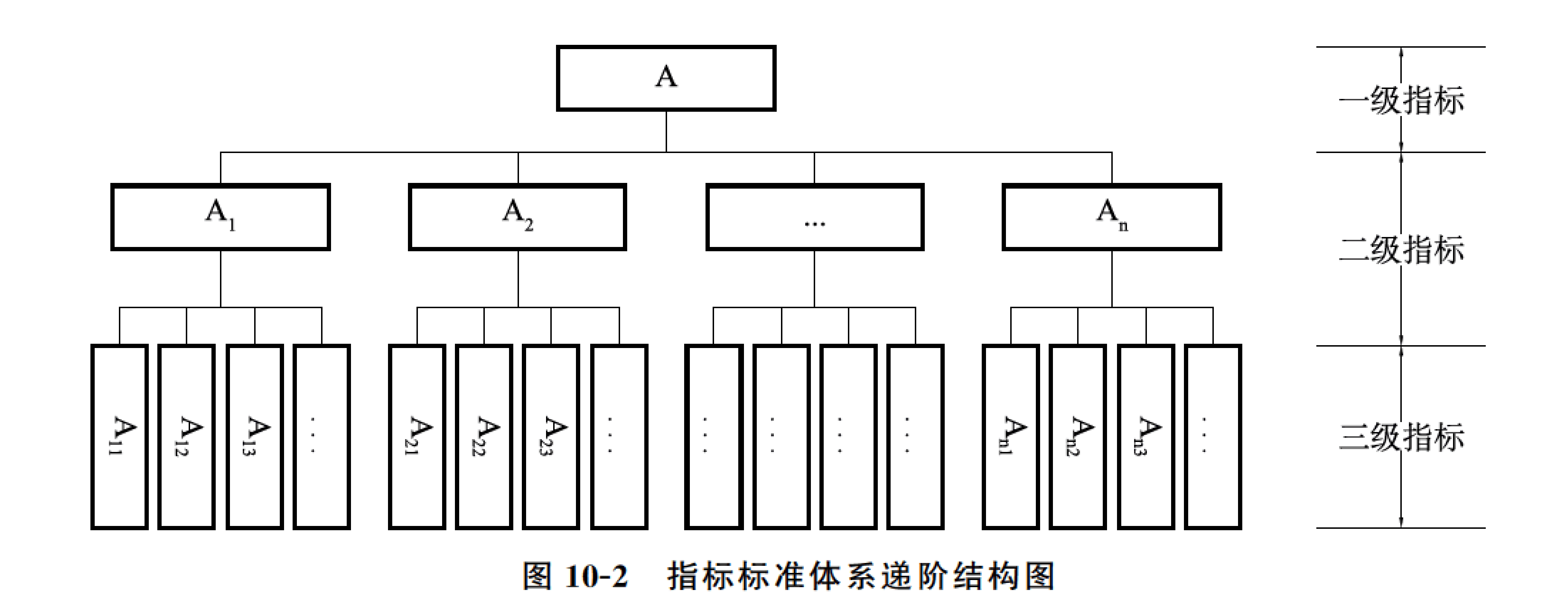


图 10-2　指标标准体系递阶结构图

四、针对性原则

针对性原则是指评价标准体系的建立必须针对特殊的对象、范围和层次进行总体设计，有针对性地选定指标。针对性原则是确定指标的基本原则。针对性原则要求评价指标必须针对被评价对象的共同属性，客观反映对象属性中的共性。

针对性原则主要包括以下三个方面。

（1）指标体系的提出要符合评价内容的实际，针对不同的内容和特定的对象。

（2）在各个层面上，指标体系中的指标要能够有针对性地反映评价的目的。指标不是越多越好，要选取最适用、最恰当的指标。

（3）指标体系的建立必须遵循评价内容固有的规律。如对军事需求的综合评价，从联合能力需求、军种能力需求、部队编成需求、思想政治需求、指挥体制需求、武器装备需求、人才建设等方面进行评价，都应遵循相应的规律。

五、全面性原则

全面性原则是一个涵盖范围甚广的概念，在指定指标体系的同时要充分考虑到不同军事需求综合评价类型之间的差异和军事需求综合评价不同子系统之间的联系，既要有反映不同军事需求综合评价差异的指标，也要有反映子系统联系的指标，保持指标体系之间的完整性和全面性。

全面性原则是指评价标准体系的建立必须全面反映军事需求的普遍原则，并能从

这些指标中得出对军事需求评价对象的全面认识。全面性原则是指标科学性的重要品质。遵循全面性原则,必须制定一个完整的评价标准体系,不能遗漏任何重要指标。

全面性原则主要包括以下两个方面。

(1)指标数量要适度,在充分覆盖和反映军事需求要素的基础上,选取综合性强的指标,保证指标尽量少、覆盖面尽量大。这样,一方面反映了指标体系的科学性和精确性,另一方面又兼顾到完整性的客观要求。

(2)要全面考虑指标的认可度和接受推广性。如果指标不易测量或测评数据难以采集等,也会失去评价的意义。因此,指标的测评要简明扼要,统计资料收集方便;指标设立要层次鲜明、重点突出、便于计算。

六、定性与定量相结合原则

任何事物都具有质的规定性和量的规定性,但对于一些在目前认识水平下难以量化且意义重大的目标,可以用定性指标来描述。既可使评价具有客观性,便于数学模型处理,又可弥补单纯定量评价的不足及数据本身存在的某些缺陷。

七、稳定性和动态性相结合原则

稳定性和动态性相结合原则要求既要有反映目前的指标,也要有反映变化的动态指标。但是指标体系应该在一定的时间内保持一种相对稳定的状态,以便于衡量一定时期内军事需求综合评价的发展状况。

综上所述,得到军事需求的综合评价原则如图 10-3 所示。

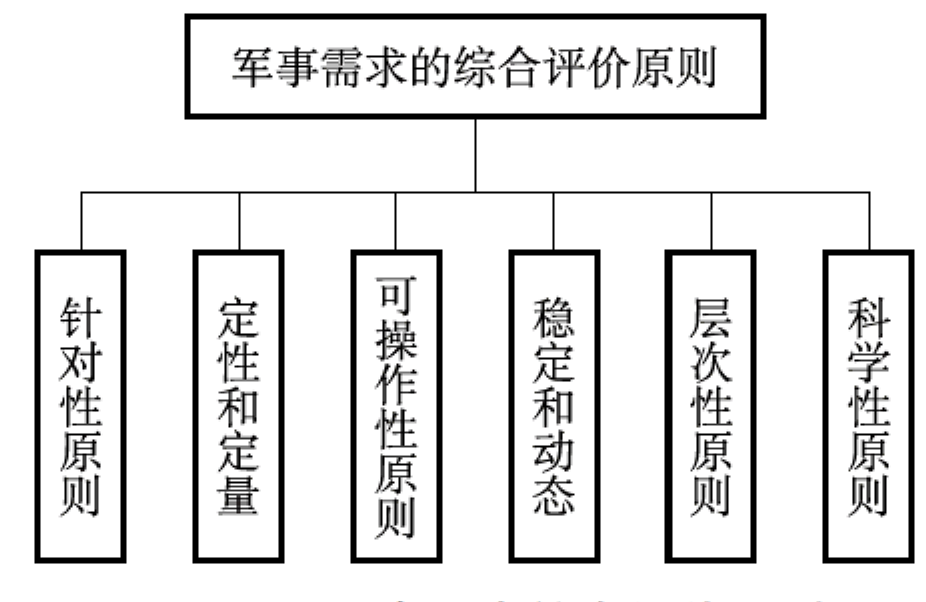


图 10-3　军事需求综合评价原则

第三节 军事需求的评价方法

军事需求评价是一个定性分析与定量分析相结合的过程。要对评价对象做出正确的测评,必须按照一定的评价流程,依据科学的处理方法进行评价。军事需求的评价方法,是随着科学技术和评价手段的发展逐渐发展的。因此,评价方法还有待于进一步研究与完善,特别是在如何准确地对一些不确定的因素和不便于量化的要素进行评价方面还不够成熟。随着信息技术以及计算手段的发展,将会创新出更多科学的算法。对军事需求进行评价,主要采取定性评价、定量评价、解析法、模拟法和综合评价等几种基本方法。

一、定性评价

定性评价就是利用所掌握的情况、资料,依靠人们的经验、知识和综合分析能力,对事物从内涵与外延两个方面,作出全面的估计和评价。定性评价作为一种常用的方法,在对军事需求进行评价时,具体方法主要有以下几种。

1. 经验对比法

经验对比法,苏军称为“回溯法”,即通过研究总结以往建立的战例、作战经验,以及在实际过程中的工作情况,找出规律性的东西,并以此为参照,评价当前军事需求的方法。这种“以史为镜”的办法,可以使人们从正反两个方面得到借鉴,从而对完善作战方案、制定周密的作战计划以及总结新的经验提供科学的指导。经验对比法使用起来简单快捷,只要熟悉战例,经验丰富,几乎不受什么客观条件的限制。但怎样根据当前的形势和特点,恰当、巧妙地活用经验,而不局限于过去的成功经验,需要评价者具有深厚的军事理论功底和丰富的作战实践经验。

2. 综合意见法

综合意见法就是依靠评价人员的集体智慧和经验，通过博采众长，互相启发，对军事需求活动的各项内容形成比较一致的看法，从而得出评价结论的方法。这种方法通常是在参加评价的人员较多、权威性较高的情况下使用。基本方法是把评价内容、项目及要求等列表发给参加评价的人员填写，经收集整理后，将分歧较大和不同意见分别列表，再次发给评价人员填写，进行第二轮征求意见。如此反复（通常为三次），最后归纳整理出多数人的意见即为评价结论。为了确保评价的准确性和权威性，参加评价的人员应具有广泛的代表性，除了上级机关和部队代表外，还应包括各方面的专家学者。在评价前，应将全部资料和评价内容交给他们，通过"背靠背"的方式匿名填写各自的意见；最后将意见集中、归纳后，再返回给所有参加评价者，请他们进一步发表意见或修正自己的评价结论。最后再以较为集中的意见作为评价结论。但在运用这个方法时，也应特别注意不要漏掉具有真知灼见的少数意见。该方法的缺点是需要时间较长。

3. 特尔斐咨询法

特尔斐咨询法是美国兰德公司于 20 世纪 50 年代初创立的一种"背靠背"的专家集体评价方法。其基本思想是通过多轮有控制的反馈，多次开启专家思路，并真正无所顾忌地畅所欲言，使最后集中起来的专家意见科学可靠。

采用特尔斐咨询法应有统一的评价内容、评价准则和评价方法。制定统一的评价内容咨询表，并分发给参加咨询的专家，请他们独立地就每个指标给出判断，然后用统计方法集中专家的意见，经过几轮结果反馈和判断，最终产生一致性的评价结论。统计内容有两个：

（1）每一指标权重的平均估计值，其计算公式为

$$W_j = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}, \quad i = 1,2,\cdots,m$$

式中，w_{ij} 是第 j 个专家对第 i 个指标权重的估计值。

（2）每一个专家的估计值 w_{ij} 与平均估计值 w_i 的偏差，其计算公式为：

$$\Delta_{jj} = w_{jj} - w_i, \quad j=1,2,\cdots,m$$

第一轮咨询、统计工作完成后可得到初步的评价结论。然后，再进行第二轮咨

询。进行第二轮咨询时，要将第一轮的统计分析情况反馈给专家，并请偏差值较大的专家尽量作出新的判断。一般经过3～4轮反复，就可以取得比较一致的意见。

4. 主观概率法

主观概率是人们根据经验和对事物的认识，对事物发生的可能性的估计，不同于经过反复实验得到的概率值。这种估计方法称为主观概率法。它适合于决策目标评价、战场态势评价和决心方案评价。

采用主观概率法，应首先确定主观概率。如对作战方案的可行程度和实现程度，应根据事件的相互影响和相互依存关系，通过主观分析与客观认识后给出估计值。但是，仅用主观概率法得到的估计有大量的主观预期，有很大的或然性，应结合其他评价方法一起确定评价值。

二、定量评价

定量评价，是将涉及军事需求的各项内容进行分解和量化之后进行的评价。

进行定量评价，数学方法是基础。所谓数学方法，就是利用数学的概念、理论对研究对象进行描述、推导和计算，建立关于事物内部状态和发展过程的数学模型，用数学形式表示事物量的关系及其变化的方法。对军事需求的综合的定量评价，涉及数学各分支学科的理论和方法，其中，使用网络法可用来推算系统内部的各项工作时间安排是否合理，效率高低；使用概率论可用来评价尚未实施的决策方案的可行性和实现程度；大量的参数、指标要通过数理统计来获得；模糊数学为量化军事需求活动中的复杂因素创造了条件；运筹学与军事活动有着紧密的联系，因此，在定量评价中的运用更加广泛。

对军事需求定量评价的过程，是对数的采集、提取、加工、处理、计算和分析的一个完整的过程，其核心内容就是“数”。因此，运用定量评价的方法，从“数”和“数量”的方面来把握，必须注意以下两点。

（1）要做好对指标的量化工作。定量评价结论的准确性，在很大程度上要能正确反映客观实际的原始数据来保障，但军事需求中所涉及的大量要素，并不直接表现出数量的形式。因此，做好指标的量化工作就十分重要，特别是对那些很难量化的要素，更要注意综合运用现代科学的多种方法，力求获得能够反映真实情况的数据。

（2）正确看待定量评价的结果。定量评价最后产生的结果只是一个综合判断值，数值的大小，对于数值的意义，一定要具体情况进行相应的具体分析。

三、解析法

解析法是以数学、军事运筹学等方法为基础，求解军事需求评价结果的方法，主要包括层次分析法、指数分析法、模糊综合评判法、灰色评价法等。

1. 层次分析法

层次分析法是一种多目标决策的定性分析与定量分析相结合的系统结构分析方法。其基本思想是，通过分析复杂系统所包含的因素及其相互关系，将问题分解为不同的指标，并将这些指标分解为若干个互不相同的层次结构，通过各指标之间定性关系的比较，对每一层次各指标的相对重要性给予定量表示，利用数学方法确定出每一层次的全部指标权重，把定性问题转化为定量分析，集成对各个层次的分析得出对整个系统的分析。这种方法适合军事需求评价中的任何内容。

层次分析法把专家的经验认识和理性分析结合起来，针对指标体系中同一层次的各个指标，运用两两对比分析的直接比较法，大大降低比较过程的不确定性，最终把非常复杂的系统简化为各要素之间的成对比较和简单计算。

2. 指数分析法

指数是一个简单的值，它通过一个系数或另一个系数的比较，反映一个对另一个的优势（或相关）程度。指数的概念和应用最早是在经济学中，如普尔指数、道琼斯指数。指数法就是当模型中不同的变量（即不同的量纲）无法直接进行比较时，应先转换为一个相对数（指数），即进行无量纲处理。各个分系统的影响因素的测量标准与量纲都不一致，要求得出系统的综合效能，就必须统一各个分系统效能评价值的量纲。采用“指数法”进行评价，解决了测量标准与量纲不一致的问题。

3. 模糊数学评价法

模糊现象是普遍存在的，模糊概念充斥于人的思维过程。在各个学科领域，在

工程技术和社会活动中，模糊信息与决策大量存在，带有模糊性的实际现象迫切要求数学体统恰当的量化工具。1965年，美国控制论专家扎德提出了模糊集合论，这标志着模糊数学的诞生。

模糊数学的基本方法是经过模糊变换，对多种因素所影响的事物或现象做出总的评价。军事需求系统是一个复杂的巨系统，存在许多相互影响的因素，各种因素之间有的是并列关系，有的是因果关系，随着复杂性的增加，描述系统的模糊性增加。而模糊数学拓宽了经典数学的基础。这种方法适合军事需求系统效能评价。

模糊综合评判法找到了一条解决概念划分上不确定现象的描述方法，其处理过程更接近于人类大脑解决实际问题的思维过程，能较好地反映客观效果，具有较高的实际应用价值。

4. 灰色评价法

灰色系统将随机变量看作是在一定范围内变化的灰色量，通过原始数据的处理，将灰色数变换成生成数，从生成数进而得到规律性较强的生成函数。这过程完全不必依据先验数据，而是生成数；这样生成数成了灰色系统的理论基础。灰色系统理论采用生成数，用建模方法，将信息不全的离散数据转换成信息完全、时间连续的动态模型，使有限的白色数据(信息)，得到了尽可能的利用。

灰色系统理论是研究“小样本不确定性”问题的，主要是利用已知信息来确定系统的未知信息，而使系统由“灰”变为“白”的过程。灰色评价法的最大特点是对样本量没有严格的要求，且不要求服从任何分布，运算简捷方便。军事需求评价对象的许多系统就属于灰色系统。

四、模拟法

模拟法是利用计算机，通过实兵演习、训练系统模拟或数学模拟来评价军事需求效能，包括演习模拟、计算机仿真和训练系统模拟。

1. 演习模拟

演习模拟是实兵规模演习或实兵军事训练演习的统称。采用演习模拟方法，

对军事需求综合的一系列指标进行比较、评价，为保障评价的真实性，演习模拟中的各种因素应尽可能与实战接近，各种战役、战斗的性能指标应保持不变；应针对不同的军事需求的综合制定不同的评价标准。如果标准设计得当，演习模拟法是一种行之有效的评价方法。

2. 计算机模拟

计算机模拟是利用计算机和数学进行军事需求评价的方法。这种方法是实验性研究军事需求评价的方法，也是评价军事需求的最经济和最安全的方法。计算机仿真，可以实现场景仿真，虚拟现实，根据对客观事物发展过程及各因素之间的关系，建立可描述该过程和关系的模型，编制仿真软件。通过控制和改变各个因素预测评价结果；可以利用计算机运行的高速度，把较长时间的战斗过程用较短的时间模拟出来，快速得出评价成果；可以对军事需求中的各个因素及其关系提供数量依据和预测趋势，得出评价结论提供辅助依据。

计算机模拟也有一定的局限性。建立评价模型是计算机模拟的关键，模型的构造依赖基础数据，如果数据失真，就会降低评价结果的可信度。

3. 训练系统模拟

训练系统模拟是利用智能化模拟训练系统，对相关军事训练科目进行机上演习训练的方法，如对抗演习训练、单项科目训练。这种方法可以根据评价科目设计内容，控制节奏；可以使训练内容重复模拟，进行统计分析，提高评价指标的可重复性和可再现性。另外，训练系统模拟是室内实施的模拟训练，所需经费比实兵演习少得多。

五、综合评价

综合评价，是将几种评价方法结合起来，共同用于评价活动的方法。综合评价包含以下三层含义。

（1）综合评价是指在整个评价过程中，对能够量化的评价内容采取定量评价，对难以准确量化的评价内容则采取定性评价。但就整个评价过程来说，是将二者结合起来加以运用的。如果说定性的分析方法是人们认识事物的起点，那么，定量

的分析方法则是把这种认识引向深入和精确。为此,在实际运用中,应当把握好定性分析与定量分析的范围和条件,注意它们之间的联系与转化。

(2) 综合评价是指对同一评价内容既进行定量评价,又进行定性评价。目的是发挥定量评价和定性评价的长处,弥补各自的不足。比如,定性评价不需要对各项指标进行量化,也不需要建立复杂的数学模型,而是通过运用经验和逻辑的思维,对复杂的量化指标给予定性的解释。在运用综合评价时,应以定性评价作为定量评价的逻辑起点和归宿,以定量评价作为对评价内容的局部、细节问题进行精确的数学分析,从而为定性评价提供更具说服力的依据。

(3) 综合法同时也是对解析方法和模拟方法的综合使用。综合评价是对军事需求进行评价时经常采用的一种方法。从各种评价方法的发展趋势看,定量评价将被越来越多地运用于对装备效能的评价之中,但由于反映军事人员以及环境的许多因素难以量化,同时,还由于在军事需求中存在着大量的不确定因素,在这种情况下,采取定量评价与定性评价相结合的方法,解析法和模拟相结合的方法将是今后进行军事需求评价时经常采用的基本方法。

综上所述,得到军事需求的评价方法如图 10-4 所示。

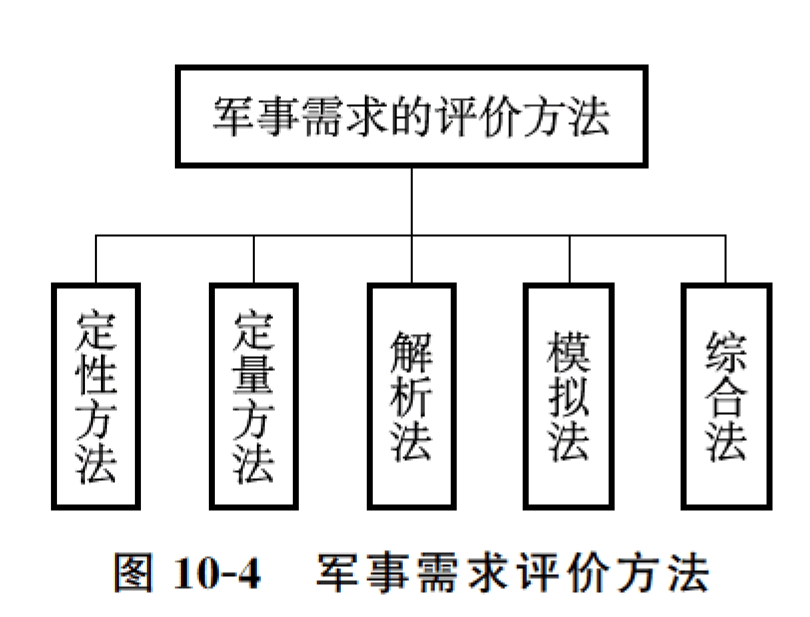


图 10-4　军事需求评价方法

第四节　军事需求的评价程序

军事需求评价的构成,军事需求评价过程包括从军事需求制定前的因素分析

开始,直到军事需求形成和实施的一个完整的过程。这个过程包括需求分析、需求设计、需求制定、需求评审和形成、需求评价和评价形成的整个过程。军事需求评价形成的过程如图 10-5 所示。

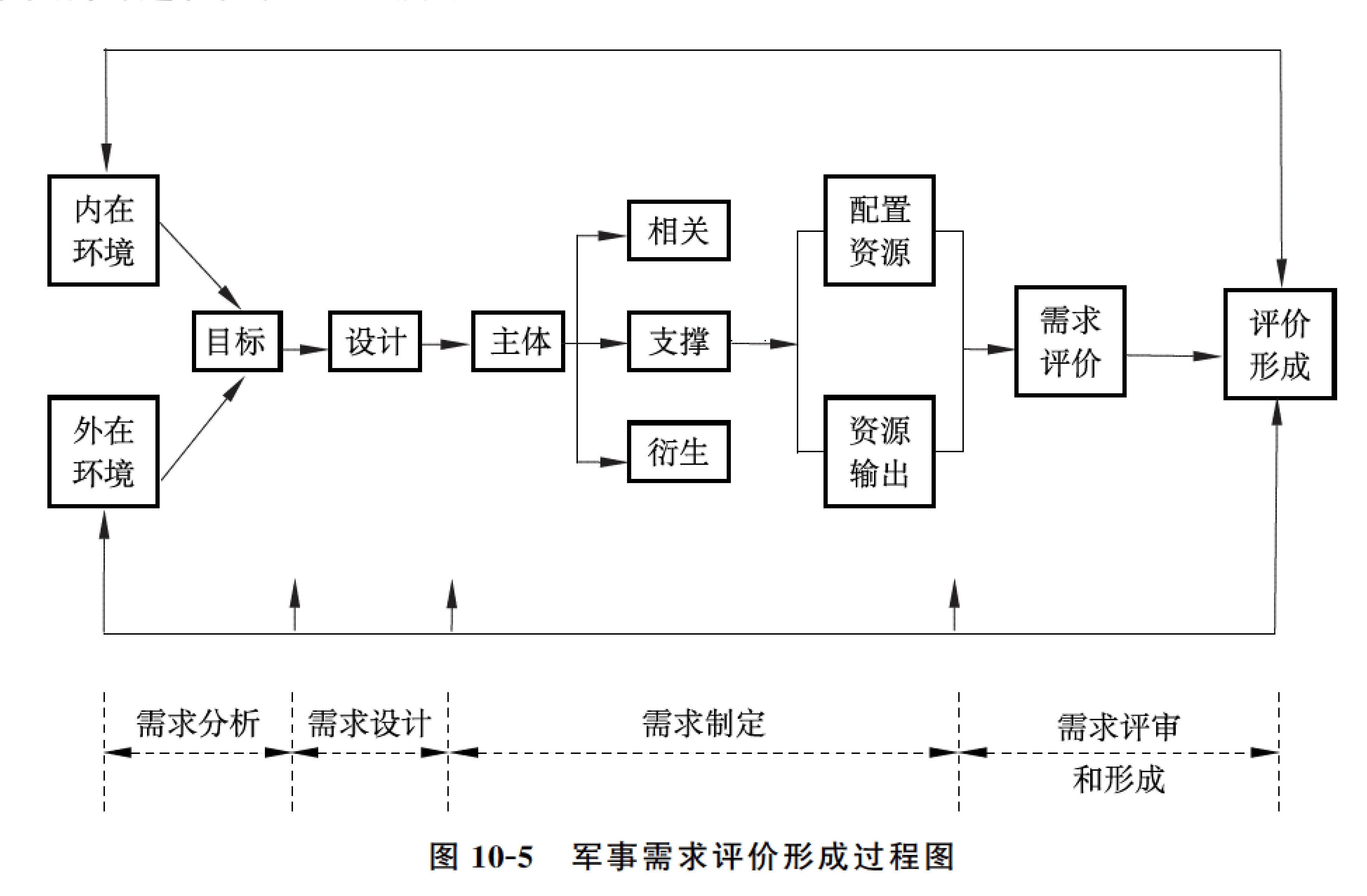


图 10-5 军事需求评价形成过程图

完整的军事需求的综合评价过程可分为明确评价目标、建立军事需求评价的指标体系、建立军事需求评价的模型、求解评价结果四个步骤。

1. 明确评价目标

明确军事需求评价的对象,评价什么问题或者方案;明确实现军事需求的评价的目标,即评价对象需要完成的任务。

2. 建立军事需求评价的指标体系

找出影响军事需求评价实现的主要因素、相关因素,制定评价指标相应的量化方法,根据建立指标体系的原则,建立军事需求综合评价指标体系。在此基础上,确定指标标准体系中每一层指标的权重。

3. 建立军事需求评价的模型

按照评价指标体系的递阶结构，确定相应的权重，建立相应的评价模型和模型的解法。

4. 求解评价结果

求出综合评价值，对照评价等级标准，由低级向高级逐层进行指标数据综合排序，获得军事需求综合评价的结果。

按照以上分析的过程，军事需求评价的一般程序如图 10-6 所示。

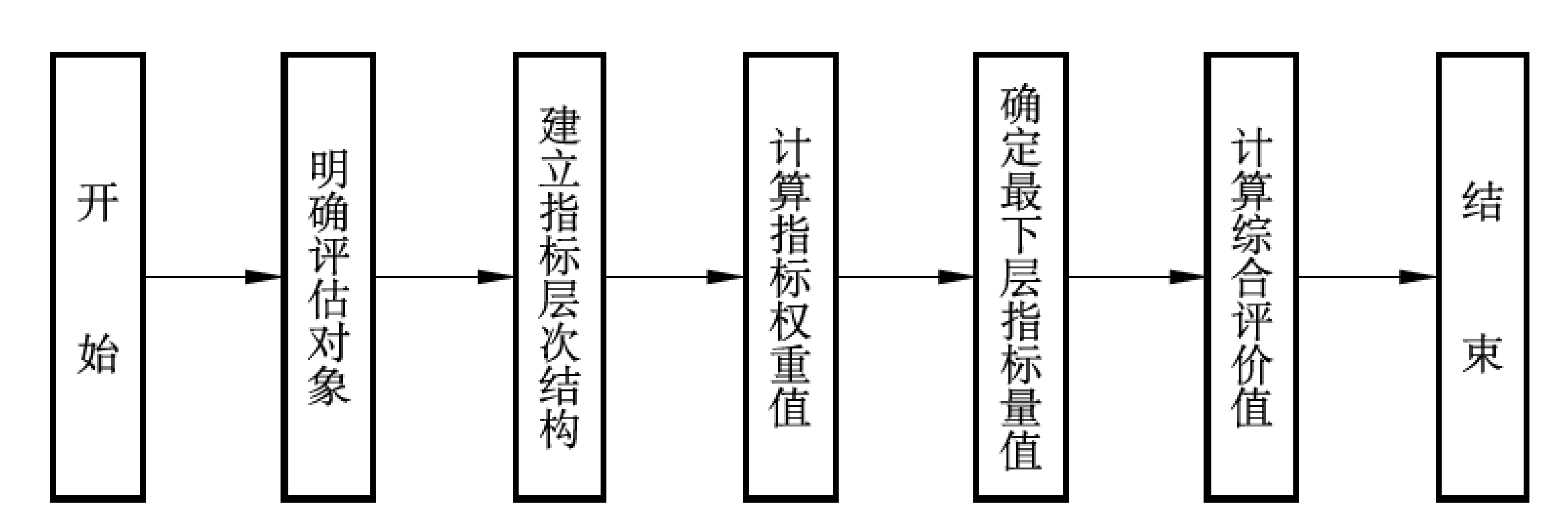


图 10-6　军事需求评价的程序图



[1]《运筹学》教材编写组．运筹学[M]. 修订版．北京:清华大学出版社,1990.

[2] 钱颂迪,等．运筹学[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

[3] Wayne L. Winston. 运筹学导论[M]. 李乃文,等,译．北京:清华大学出版社,2006.

[4] 邓成梁,等．运筹学的原理和方法[M]. 武汉:华中科技大学出版社,1997.

[5] 宁宣熙,等．运筹学实用教程[M]. 北京:科学出版社,2005.

[6] 熊伟,等．运筹学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[7] 现代应用数学手册编委会．现代应用数学手册——运筹学与最优化理论卷[M]. 北京:清华大学出版社,1998.

[8] 徐玖平,李军．多目标的决策理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

[9] Wayne L. Winston. 运筹学应用范例与解法[M]. 杨振凯,等,译．北京:清华大学出版社,2006.

[10] Frederick S. Hillier,等．运筹学概率模型应用范例与解法[M]. 胡运权,等,译．北京:清华大学出版社,2007.

[11] 谢金星,刑文训．网络优化[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

[12] 飞思科技产品研发中心．MATLAB 6.5 辅助优化计算与设计[M]. 北京:电子工业出版社,2003.

[13] 周华任,陈玉金,等．运筹学解题指导[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

[14] 王沫然．MATLAB 5.X 与科学计算[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

[15] 盛骤,谢式千,潘承毅．概率论与数理统计[M]. 2 版．北京:高等教育出版社,1989.

[16] 李怀组．决策理论导引[M]．北京:机械工业出版社,1993.
[17] 卫民堂,王宏毅,梁磊．决策理论与技术[M]．西安:西安交通大学出版社,2000.
[18] 岳超源．决策理论与方法[M]．北京:科学出版社,2003.
[19] 叶茂林．科技评价理论与方法[M]．北京:社会科学文献出版社,2007.
[20] Phaal R, Farrukh C J P, Probert D R. Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution[J]. Technological Forecasting & Social Change, 2004(7): 5-26.
[21] Hentschel T R. United States Army Organizational Transformation During the Truman and Eisenhower Administrations and its Impact on the Army Officer Corps[M]. Eisenhower Parkway. Proquest Umi Dissertaion Publishing, 2011(9).
[22] 张洋．透视美国国防部新版《无人机路线图》[J]．国防,2005(12):61-64.
[23] 姜曙光．美国新一代轰炸机发展路线图[J]．国际航空,2008(9):38-41.
[24] 廖小刚．澳大利亚国防部更新《网络中心战路线图》[J]．国防,2007(7):67-68.
[25] 曾路,孙永明．产业路线图的制定与原理[M]．广州:华南理工大学出版社,2007.
[26] 秦天,赵小松,周华任,梁国栋,等,路线图——一种新型战略管理工具[M]．北京:国防大学出版社,2009.
[27] 周华任,秦天,赵小松,等．路线图的基本原理及应用[M]．北京:清华大学出版社,2013.
[28] 周华任,姚泽清,杨满喜．系统工程[M]．北京:清华大学出版社,2011.
[29] 周华任,马亚平．随机运筹学[M]．北京:清华大学出版社,2012.
[30] 周华任,周生,等．运筹与优化[M]．北京:清华大学出版社,2012.
[31] 王俐莉,周华任,熊艳晔．临近空间武器系统[J]．装备,2014(4):69-70.
[32] 周华任,郭杰．武器装备发展路线图方法研究[J]．军事运筹与系统工程,2013(2):50-53.
[33] 周华任,马亚平,郭杰,黄建华．基于五力的武器装备作战能力评估模型[J]．火力与指挥控制,2011(2):11-14.
[34] 周华任,马亚平,马元正,陈国社．网络科学发展综述[J]．计算机工程与应用,2009(8):7-10.